AGUA EN MARTE • ONCOLOGIA CANINA

INVESTIGACION y CIENCIA

30 aniversario

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

LA HIJA DE LUCY

EN BUSCA DEL CODIGO NEURAL

LASERES BLANCOS

NOMADAS DE EURASIA

PRODUCTOS NATURALES DE ORIGEN MARINO

LA GRACILIZACION DEL ESQUELETO HUMANO



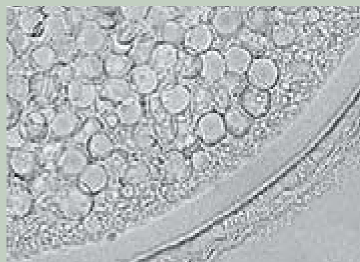
FEBRERO 2007
6,00 EUROS

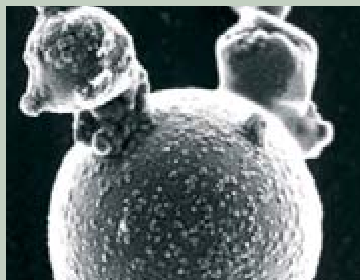
INVESTIGACION y CIENCIA

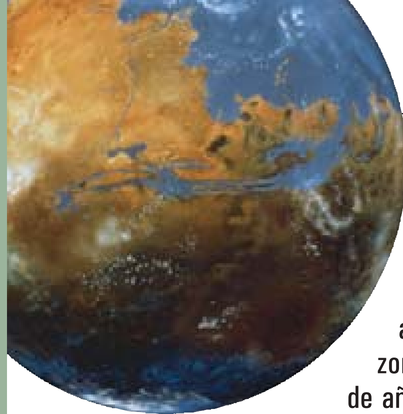
Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

Febrero de 2007

Número 365













INVESTIGACION y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
Laia Torres Casas
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR EDITOR Michelle Press
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Mark Fischetti, Steve Mirsky, George Musser y Christine Soares
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
GENERAL MANAGER Michael Florek
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Dean Sanderson
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN Brian Napack

DISTRIBUCION
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca
Trigo, 39, Edif. 2
28914 Leganés (Madrid)
Teléfono 914 819 800

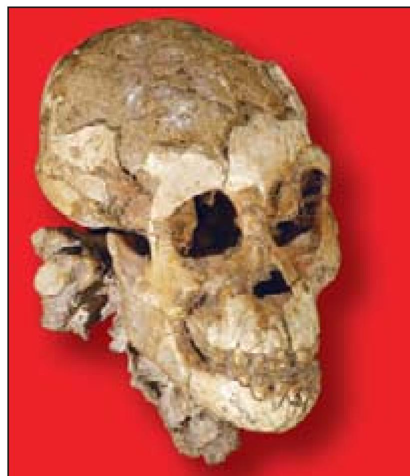
para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

M.ª Rosa Zapatero Osorio: *Agua en Marte*; Luis Bou: *En busca del código neural* y *La gracilización del esqueleto humano*; Carlos Lorenzo: *La hija de Lucy*; Felipe Cortés: *Oncología canina*; Javier Mangado: *Nómadas de Eurasia: una "civilización" de las estepas*; Ramón Pascual: *Un nuevo kilogramo*; J. Vilardell: *Hace...*, *Apuntes* e *Ideas aplicadas*; Jürgen Goicoechea: *Curiosidades de la física*; Marián Beltrán: *Desarrollo sostenible*



Portada: Zeresenay Alemseged (cráneo); © Authority for Research and Conservation of Cultural Heritages

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	65,00 euro	120,00 euro
Resto del mundo	90,00 euro	170,00 euro

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

Difusión controlada 

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

...cincuenta años

El virus de la gripe. «La partícula del virus posee una estructura relativamente sencilla que podemos esperar conocer bastante bien. Nuestro conocimiento de la célula viva normal es a la vez enormemente extenso y absolutamente incompleto. La célula infectada nos obsequia con un problema de mayor complejidad. Acaso sea característico de la cada vez más dilatada frontera de la biología que cuando se pretende estudiar un fenómeno nuevo, como la multiplicación vírica, resultan irrelevantes todos los conocimientos sobre química y función celulares adquiridos en otros estudios. Por ello, todo intento de describir lo que ocurre en la célula infectada debe ser necesariamente provisional y simplificado. Un virus no constituye un organismo independiente en el sentido ordinario de la expresión, sino algo que podríamos calificar de patrón biológico itinerante. Ese patrón es transportado de célula a célula por las partículas víricas inertes, pero en cada infección adquiere una nueva vida, prestada de su huésped. —Sir Frank MacFarlane Burnet» [Nota de la Redacción: Burnet recibió el premio Nobel de fisiología o medicina de 1960.]

...cien años

Aire fresco. «En las minas de todas clases, en los servicios contraincendios, en las cámaras de amoniaco de las plantas de refrigeración alimentaria y en otros establecimientos industriales se emplean cascos antihumos, chaquetas antihumos y aparatos respiratorios autónomos. Se trata de un curioso equipo ideado para proporcionar al usuario alrededor de cuatro horas seguidas de aire artificial, aunque perfectamente respirable. El oxígeno lo suministra un cilindro de acero. La reposición del oxígeno suele constituir un problema grave, por ejemplo en los remotos distritos mineros de Sudamérica. Algunas compañías navieras se niegan tajantemente a transportar oxígeno en cilindros de acero; pero una nueva sustancia, de nombre ‘oxilita’, ha hecho su aparición. El producto se prepara en pequeñas pastillas listas para uso inmediato, que en contacto con agua desprenden oxígeno puro.»

...ciento cincuenta años

Asesinato. «En la mañana del día 29 del mes pasado, el doctor H. Burdell fue hallado apuñalado en la habitación donde se alojaba en esta ciudad. Entre él y su gobernanta existían fuertes rencores, pero la ciencia ha eliminado los que en principio parecían indicios sólidos de culpabilidad. En uno de los cajones de la mujer se encontró un puñal con leves manchas de sangre; un análisis químico mostró que tales restos eran de orín. Una evidente mancha de sangre en un vestido de seda azul resultó ser de almíbar o confitura. Una navaja procedente del lugar de trabajo de un huésped sospechoso y un periódico hallado en la habitación del mismo exhibían unas manchas que dieron positivo en los análisis de detección de sangre; el microscopio reveló que se trataba de glóbulos rojos arteriales. Ello probablemente pesará como pruebas en su contra.»

Maelstrom. «Me ha informado un amigo europeo de que el maelstrom, ese sistema de remolinos y corrientes que se localiza frente a las costas noruegas, representado en todas las geografías, y sobre el que hemos oído tan asombrosas historias, carece de existencia. Me dice que el rey de Dinamarca nombró una comisión náutica y científica con la misión de acercarse lo más posible al borde del torbellino, circunnavegarlo, medir su perímetro, observar su comportamiento y redactar un informe. Se hicieron a la mar y navegaron por donde se decía que se produce el maelstrom, pero hallaron unas aguas tan tranquilas como en el resto del mar del Norte. Siempre me habían contado que el maelstrom constituía un fenómeno marino establecido y que barcos, e incluso enormes ballenas, eran a veces arrastrados al seno de sus terribles remolinos y sumergidos para siempre en las pavorosas honduras oceánicas.»

Agricultura de Illinois. «La figura adjunta ilustra la Sembradora de R. Hurd, de Milline (Illinois). La perspectiva muestra la máquina trabajando en medio de las inmensas praderas, arrastrada por un tiro original, grave y majestuoso, pero no por ello menos brioso. A la vez que el artefacto es impulsado hacia adelante, la simiente cae sin parar.»



Agricultor de las grandes llanuras lanzando la simiente, 1857

APUNTES

GENETICA

Semillas de algodón comestibles

En la novela de Joseph Heller *Trampa-22*, Milo Binderminder, el oficial encargado del comedor, piensa en deshacerse de un excedente de algodón egipcio recubriéndolo de chocolate y sirviéndoselo a los soldados. Mala idea: la semilla del algodón contiene gosipol, una toxina. Pero en la Universidad A&M de Texas han descubierto un procedimiento para cultivar plantas de algodón que producen semillas sin gosipol. Afirman que este descubrimiento podría aportar alimento de alto contenido proteínico a 500 millones de personas. Con técnicas de interferencia de ARN, silenciaron el gen responsable de la síntesis de gosipol en la semilla de algodón. Para determinar la efectividad del silenciamiento hacen falta aún pruebas de campo, fuera del invernadero.

—Nikkil Swaminathan



El silenciamiento genético convierte las semillas de algodón, de ordinario tóxicas, en un alimento seguro

FISICA APLICADA

Recarga inalámbrica

Se espera transmitir energía eléctrica para recargar aparatos portátiles sin que intervenga cable alguno. El procedimiento se basaría en la inducción, fenómeno por el que un campo magnético variable genera una corriente eléctrica en un conductor cercano. Para aumentar el alcance y la potencia, proponen en el Instituto de Tecnología de Massachusetts intercalar un pequeño intersticio en un aro metálico y fijar dos discos en cada extremo. Al electrificarse, ese objeto posee una frecuencia natural resultante del paso de corriente en vaivén a lo largo del aro, desde un disco hacia el otro. Un segundo aro que porte la misma frecuencia recibirá energía del primero a través del campo magnético. A una distancia de pocos metros, podrían transmitirse decenas de watt, potencia suficiente para alimentar un ordenador portátil.

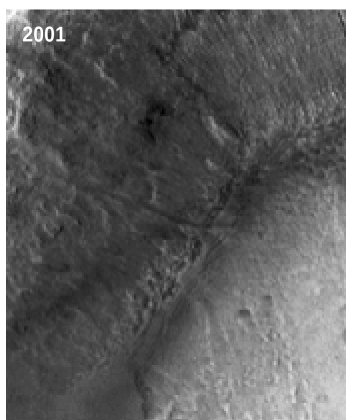
—J. R. Minkel

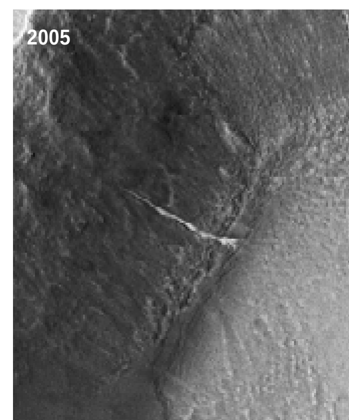
ASTRONOMIA

Corrientes marcianas

Los depósitos que se han formado en los barrancos marcianos en los últimos siete años sugieren que hoy existe en Marte agua líquida. Una imagen tomada en 2005 por el satélite Mars Global Surveyor muestra en la pared de un cráter un rastro descendente que no aparecía en la imagen anterior del mismo cráter, tomada apenas cuatro años antes. En las fotografías registradas con posterioridad, la luz solar incide desde ángulos distintos, pero subsiste el material de color más claro, lo que sugiere que no se trata de un capricho de la luz ni el resultado de una erosión seca. Análogamente, las imágenes de otro cráter tomadas en febrero de 2004 muestran los inicios de otro depósito, cuyo crecimiento se aprecia en imágenes subsiguientes, según se informa en *Science*. Podría ser difícil hallar más ejemplos, dado que la NASA perdió contacto con el Mars Global Surveyor en noviembre pasado tras diez años de funcionamiento.

—J. R. Minkel





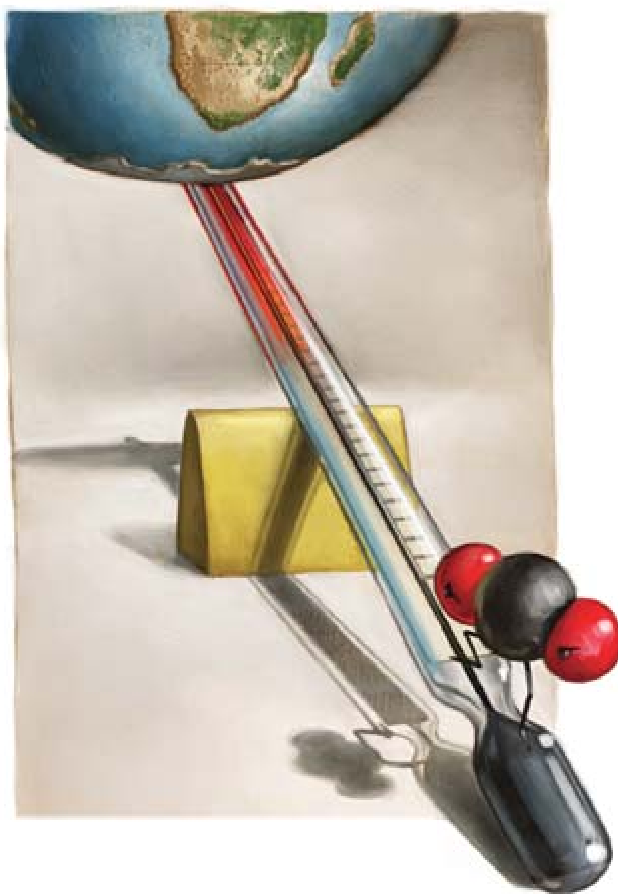
Un rastro claro aparece en la pared de un cráter de Marte cuatro años después de otra imagen tomada por el Mars Global Surveyor, donde no se apreciaba

CORBIS (*arriba*); NASA / JPL / MALIN SPACE SCIENCE SYSTEMS (*abajo*)

CLIMATOLOGIA

¿Por qué es achacable al CO_2 el calentamiento global?

Aunque el dióxido de carbono sólo sea un constituyente secundario de la atmósfera, constituye uno de los pocos gases atmosféricos que retiene el calor que irradia la Tierra. En la superficie de ésta se absorbe la radiación visible procedente del Sol; genera calentamiento. La superficie, al propio tiempo, devuelve al espacio radiación infrarroja; genera enfriamiento. Cuanta más luz solar absorbe la superficie, más radiación torna al espacio, hasta que el calor cedido a éste se iguala al calor absorbido del Sol. Los gases que forman más del 99 por ciento de la atmósfera —nitrógeno, oxígeno y argón— no absorben la luz visible ni la infrarroja. Los gases más abundantes después de estos mayoritarios, el vapor de agua y el CO_2, sí absorben una fracción del calor infrarrojo irradiado por la Tierra, con lo que impiden que llegue al espacio. En esto consiste el llamado efecto invernadero, sin el cual nuestro planeta tendría una superficie helada. Aunque el dióxido de carbono y el vapor de agua compongan sólo una pequeña fracción de la atmósfera, sus moléculas comparten el calor que absorben con las moléculas de nitrógeno, oxígeno y argón con las que colisionen. La atmósfera actúa a modo de manto, tanto más aislante cuando más aumente la presencia de vapor de agua, CO_2 y otros gases de invernadero. El efecto calefactor del contenido adicional de dióxido de carbono, metano, óxido nitroso y otros gases secundarios puede calcularse con precisión gracias a sus propiedades, que se han medido en los laboratorios. El calentamiento total producido por el incremento de todos esos gases de invernadero de vida larga desde los tiempos preindustriales es aproximadamente igual al 1 por ciento de la radiación solar absorbida en la superficie. Un efecto similar al que produciría un sol que hubiera brillado con una intensidad un 1 por ciento mayor durante el siglo XX. Parecerá poco, pero pequeños cambios en el balance térmico terrestre pueden desencadenar grandes cambios climáticos. Entre las eras glaciales y los períodos más cálidos intermedios de los últimos millones de años parece haber habido unas diferencias globales medias de temperatura de sólo unos cinco grados Celsius en los trópicos y de ocho grados C en las regiones polares.



—Pieter Tans
Laboratorio de Investigaciones sobre el Sistema Terrestre de la Administración Nacional del Mar y la Atmósfera de Estados Unidos

PSICOLOGIA

Dinero inconsciente



El dinero es un aliciente para trabajar más, pero también fomenta las conductas egoístas. ¿Verdades de perogrullo? Un equipo de psicólogos de la Universidad de Minnesota descubrieron recientemente que basta con pensar en el dinero para que nos volvamos menos propensos a ayudar a los demás. Hicieron que algunos voluntarios recordaran subconscientemente el dinero mostrándoles algunas palabras relacionadas con el vil metal, tales como “salario”, o dejando ver un cartel con billetes de banco. A otros participantes se les preparó con dinero ficticio o estímulos neutros. A continuación había que ejecutar distintas tareas no relacionadas con dinero, si bien permitían valorar el comportamiento de los participantes en situaciones sociales. Con dinero presente en la mente, se mostraban poco dispuestos a pedir ayuda al enfrentarse a un problema difícil e incluso imposible. Los individuos que pensaban en el dinero eran menos amables que los demás, según informan los investigadores en *Science*.

—Ciara Curtin

MATT COLLINS (*arriba*); CORBIS (*abajo*)

Las observaciones recientes de vehículos robots y sondas espaciales indican que no sólo hubo agua líquida en Marte, sino que cubrió, además, zonas extensas de su superficie durante mil millones de años largos

1. EL AGUA CORRE sobre la superficie marciana en esta representación artística del planeta rojo, tal y como pudo ser hace entre 2500 y 4000 millones de años. Los depósitos salados en el borde del agua aparecen purpúreos en nuestra imagen crepuscular.

Agua en Marte

JIM BELL

En febrero de 2005, Spirit, un robot para la exploración de Marte, llevaba más de un año recorriendo el cráter Gusev, del tamaño de la provincia de Sevilla y de un par de kilómetros de profundidad. Puesto que Gusev se encuentra al final de un antiguo valle fluvial seco, más largo que el Gran Cañón, muchos de los miembros del equipo que se encarga de la misión esperábamos que el vehículo hallaría pruebas de que el cráter estuvo lleno de agua hace miles de millones de años. En las llanuras sobre las que aterrizó, sin embargo, no se encontraron ni depósitos lacustres ni cualquier otro signo de que el agua hubiese fluido alguna vez en el interior de Gusev. Las fotografías mostraban un secarral de polvo, arena y rocas de lava volcánica.

Pero todo cambió cuando Spirit se aproximó a las laderas de las colinas Columbia, a unos 2600 metros del punto de aterrizaje. Mientras el robot se esforzaba por remontar la ladera oeste de la colina Husband (cada colina lleva el nombre de uno de los siete astronautas fallecidos a bordo del transbordador Columbia en el desastre de 2003), sus ruedas desplazaban piedras y marcaban rodadas profundas en el suelo marciano. En una parte muy resbaladiza, a la que se llamó Paso Robles, las ruedas destaparon accidentalmente unos depósitos exóticos, de color blanquecino, que no se parecían a nada visto en Gusev.

RON MILLER

Basándose en los nuevos datos obtenidos por las últimas misiones a Marte, se ha propuesto la siguiente cronología, que incluye un extenso pasado con

Hace entre 4600 y 4200 millones de años



EPOCA DE LOS GRANDES IMPACTOS
Tras la formación de Marte, los asteroides y cometas bombardean el planeta, creando gigantescos cráteres de impacto y desencadenando una intensa actividad volcánica. Océanos de magma (roca líquida) fluyen por la superficie.

Hace entre 4200 y 3500 millones de años



EPISODIOS CON CONDICIONES SIMILARES A LAS TERRESTRES
Cuando los impactos aminoran, el agua líquida llena algunas calderas y esculpe valles fluviales gigantescos.

MICHAEL CARROLL

Spirit había ya abandonado Paso Robles antes de que el equipo de la misión se percatara de esos depósitos; cuando supimos lo que se había destapado, hicimos que el vehículo volviera sobre sus pasos.

En la nueva inspección, determinamos que los depósitos contienen minerales sulfatados e hidratados, ricos en hierro y magnesio, concentrados por debajo mismo de la superficie polvorienta. En la Tierra encontramos esta clase de depósitos donde se ha evaporado agua salada o el agua subterránea interactúa con los gases y fluidos volcánicos. Cualquiera de los dos procesos podría haber ocurrido en Marte. (Aunque no se han hallado volcanes activos en Gusev, ni en ninguna otra parte de Marte, sin duda hubo erupciones en otras épocas.) Independientemente de qué hipótesis sea la correcta, comprendimos que las sales sulfatadas en el subsuelo marciano podían ser remanentes de un antiguo entorno acuático en Gusev.

El descubrimiento casual de Spirit concuerda con los hallazgos del Opportunity, el robot rodado que investiga en el otro lado de Marte, y de la pequeña flota de satélites que desde su órbita fotografían la superficie del planeta. Siempre se había creído que Marte era un mundo inhóspito, frío y seco, que las huellas de inundaciones ocasionales y de minerales alterados por el agua eran anomalías, breves desviaciones acontecidas en un pasado lejano, poco después de la formación del planeta rojo hace 4600 millones de años. Pero la nueva información aportada por los vehículos, los satélites y los meteoritos nos revela un panorama muy diferente. Todo indica que el agua cubrió zonas extensas de la superficie marciana durante largos períodos, sin duda en fases muy tempranas de la historia del planeta y, quizá también, en épocas más recientes. Las implicaciones de esta afirmación son profundas: si los momentos en que reinaban condiciones terrestres se dieron con frecuencia y de manera prolongada, resulta mucho más probable que la vida se desarrollara en Marte.

Resumen/*Marte húmedo*

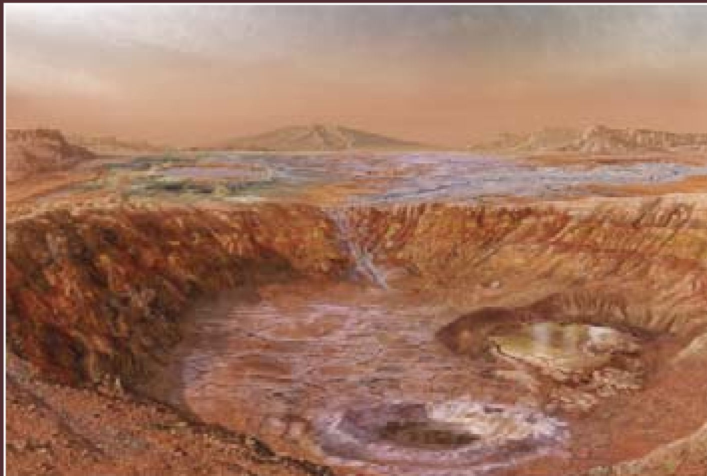
- Según los últimos resultados de los robots y de las naves en órbita alrededor de Marte, en las primeras épocas del planeta debieron de prevalecer, largo tiempo, unas condiciones húmedas y templadas.
- Si las épocas con condiciones similares a las de la Tierra fueron frecuentes y prolongadas, pudo aparecer la vida y evolucionar.
- Las futuras misiones a Marte podrían someter a prueba esta hipótesis datando la edad de los suelos primigenios.

Cursos de agua

En las imágenes de Marte tomadas por las naves espaciales Mariner y Viking durante los años setenta se identificaron formaciones fluviales, accidentes geológicos presumiblemente causados por el agua. Se componen de enormes canales excavados por riadas catastróficas y redes de valles, que recuerdan en cierto grado a los sistemas de drenaje de los ríos de la Tierra. Las imágenes obtenidas por el Explorador Global de Marte, desde su puesta en órbita alrededor del planeta en 1997, han revelado unas estructuras espectaculares que parecen barrancos jóvenes, pequeñísimos, en las paredes de algunos cráteres y cañones. Estos datos apuntan a la presencia pasada de agua líquida en la superficie marciana, o justo por debajo de ella, pero no necesariamente durante largos períodos de tiempo. El agua de las riadas catastróficas, por ejemplo, quizá durase sólo unos pocos días o semanas en la superficie antes de congelarse, filtrarse de nuevo en el terreno o evaporarse.

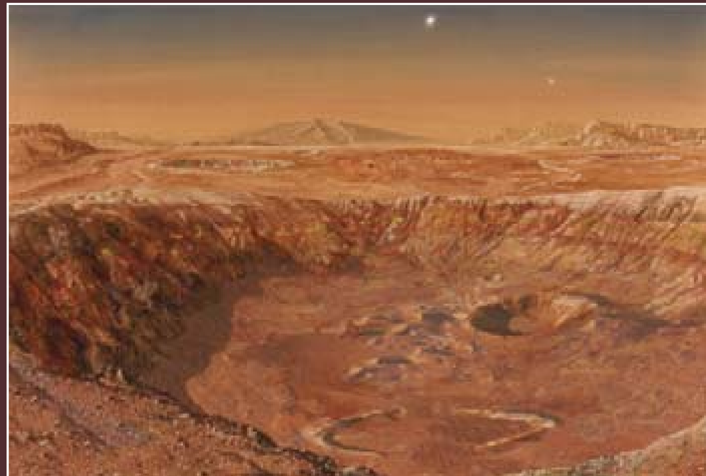
agua (*las fechas son aproximadas*).

Hace entre 3500 y 2500 millones de años



DESHIDRATACION Y ENFRIAMIENTO
El azufre de los volcanes de Marte se disuelve en las lagunas de agua. Las acidula y destruye las arcillas. El agua de la superficie empieza a helarse, pero algunas inundaciones esporádicas crean grandes canales de desagüe.

Hace entre 2500 millones de años y hoy



ARIDO E INHOSPITO
La actividad volcánica cesa; el polvo cubre una fracción mayoritaria del planeta. Pero todavía podría existir agua líquida bajo la superficie. Saldría en ocasiones al exterior y crearía barrancos en las paredes de cañones y cráteres.

Es más, las redes de valles de tipo fluvial que se observan en las imágenes de la nave Viking no tienen, cuando se las analiza con mayor resolución, las mismas propiedades que los valles fluviales terrestres. Los valles marcianos quizá se formasen sólo por la acción de una corriente de agua subterránea y de la erosión del suelo —una "socavación"—, no por agua que fluyese a lo largo de la superficie. Los barrancos que se ven en las imágenes del Explorador Global de Marte podrían ser también el resultado de que se filtrasen aguas subterráneas bajo el hielo, o procedentes de cúmulos de nieve enterrada.

Estos indicadores de la presencia de agua en Marte, aunque asombrosos y contundentes, no bastan para admitir que el planeta rojo gozara de un entorno más temperado y húmedo, más parecido al terrestre, con lagos y ríos persistentes.

En los últimos años, las imágenes tomadas por nuevos satélites han aportado pruebas mucho más sólidas de la prevalencia de condiciones estables en Marte similares a las terrestres, durante largos períodos. Uno de los descubrimientos más apasionantes se refiere a los accidentes semejantes a deltas fluviales. El mayor y mejor ejemplo, fotografiado por el Explorador Global de Marte, está situado al final de la red de valles que desembocan en el cráter Eberswalde, una región al sudeste del sistema de cañones Valles Marineris (*véase la figura 2*). Este sistema de drenaje presenta una estructura laminar en abanico, de 10 kilómetros de anchura, con crestas serpenteantes que se entrecruzan y presentan diversos grados de erosión. Muchos ven en esta estructura todas las características de un delta en la desembocadura de un río que arrastre sedimentos hasta un lago somero.

Al igual que el delta del Mississippi, la estructura en abanico de Eberswalde da a entender que su crecimiento y forma se modificaron en numerosas ocasiones, respondiendo seguramente a cambios en el caudal del antiguo río. Si el abanico de Eberswalde constituye en verdad el depósito de un delta fluvial, enterrado bajo sedimentos posteriores y erosionado en fecha más cercana, habrá que inferir lo siguiente: el agua líquida fluyó con persistencia sobre la superficie marciana, donde por erosión creaba grandes volúmenes de materiales sedimentarios, que transportaba corriente abajo.

Las imágenes de los satélites artificiales descubren también un número de abanicos similares en otras regiones de Marte, pero sólo se ha fotografiado el 5 por ciento de la superficie del planeta con la resolución necesaria para identificar estas estructuras. Las próximas observaciones de las naves orbitales someterán a prueba la hipótesis de los deltas. Mas, para determinar cuánto tiempo fluyó el agua que creó los abanicos, habrá que medir con precisión las edades absolutas y relativas de las distintas zonas de las formaciones fluviales.

La determinación de las edades absolutas no puede acometerse en órbita. Se han de enviar muestras de roca de las regiones en cuestión a la Tierra, para un análisis detallado. En el futuro, podrían examinarlos sobre el terreno vehículos que se hallen equipados para efectuar una datación isotópica.

Otro dato en favor de la tesis de un clima terrestre en el pasado de Marte nos lo ofrecen las imágenes de alta resolución, tomadas por las sondas Mars Odyssey y Explorador Global. Muestran redes de pequeños valles que surcan las planicies y paredes del sistema de cañones Valles Marineris.

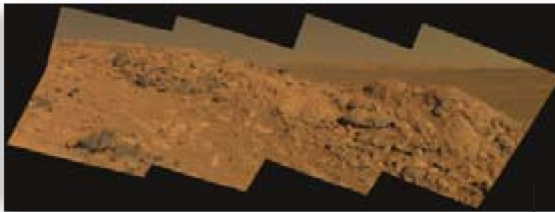
A diferencia de las redes de valles descubiertas con anterioridad, cuyo origen se atribuye a las corrientes subterráneas, las recién descubiertas presentan características acordes con un origen pluvial o fruto de deshielos y escorrentías. Definen patrones densos y bifurcados; las longitudes y anchuras de sus valles aumentan desde el nacimiento hacia la desembocadura. Es más, nacen

INSTANTANEAS DE LA BUSQUEDA DE AGUA

Los robots Spirit y Opportunity, vehículos para la exploración de Marte que se mueven sobre el planeta rojo desde enero de 2004, han descubierto indicios valiosos sobre un pasado marciano cálido y húmedo.

VISTA DESDE EL PUNTO DE ATERRIZAJE

Spirit no encontró nada más que polvo, arena y rocas volcánicas en su punto de aterrizaje, pero las colinas Columbia se asoman en la distancia.



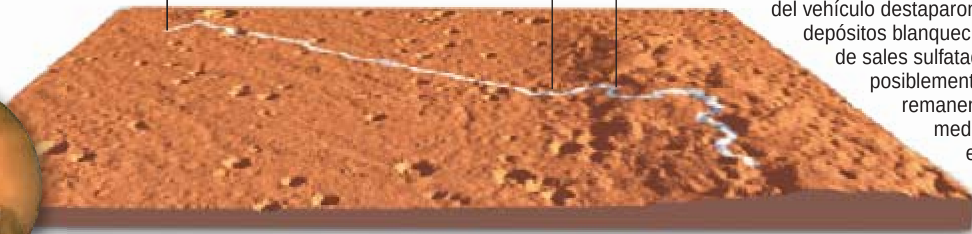
GRAN CUERNO EN EL ESPOLON OESTE

Tras siete meses de misión, el vehículo alcanzó el afloramiento Longhorn en el espolón occidental de las colinas Columbia.

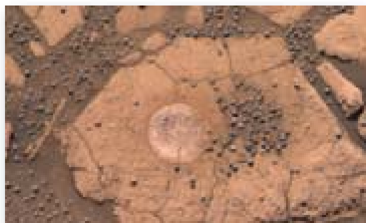
SUELO DE PASO ROBLES

En la colina Husband, las ruedas del vehículo destaparon unos depósitos blanquecinos de sales sulfatadas, posiblemente remanentes de un medio acuoso en Gusev.





SPIRIT aterrizó en el cráter Gusev, de 165 kilómetros de diámetro (*punto blanco a la izquierda*), que se encuentra donde acaba un antiguo valle fluvial seco. Sólo descubriría indicios de que hubiese habido agua cuando abandonó la llanura donde aterrizó y se internó en las colinas Columbia, 2600 metros al este.



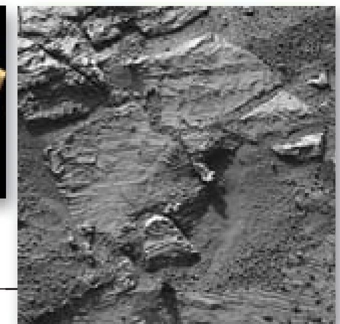
TAZON DE BAYAS

En los afloramientos del cráter Eagle, el vehículo Opportunity halló unos granos esféricos de tamaño milimétrico (apodados arándanos), el precipitado quizá de la evaporación de agua con hierro o sales.



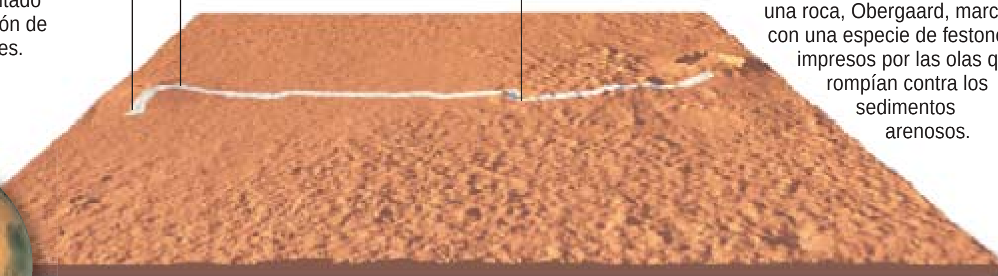
EL ACANTILADO BURNS

En el cercano cráter Endurance, estudió el acantilado Burns, un poderoso afloramiento laminar que reforzó la hipótesis de que el agua cubrió periódicamente ese terreno.



ORLAS EN OBERGAARD

Al borde del cráter Erebus halló una roca, Obergaard, marcada con una especie de festones impresos por las olas que rompían contra los sedimentos arenosos.



El vehículo OPPORTUNITY tocó la superficie de Marte en el cráter Eagle, de la región Meridiani Planum, y pronto halló extensos afloramientos laminares de rocas sedimentarias, indicación de que el agua permaneció largo tiempo, al menos una vez, sobre la superficie. Desde entonces, el robot ha viajado hacia el sur y ha empezado a explorar el cráter Victoria, de 800 metros de anchura.

NASA/STSCI/JIM BELL (*imágenes globales*); RON MILLER (*mapas transversales*); NASA/JPL/CORNELL (*punto de aterrizaje, Longhorn, Paso Robles*); NASA/JPL/CORNELL (*tazón de bayas, acantilado de Burns*); NASA/JPL-CALTECH/CORNELL (*orlas*)

en las crestas de las colinas, señal de que el paisaje está modelado por precipitaciones y escorrentías. Esta orografía proporciona el mejor indicio hasta la fecha de que en Marte pudo llover.

Una posibilidad más remota es que esos accidentes del terreno que reflejan la acción de la escorrentía no apareciesen al principio de la historia de Marte, sino entre mil y mil quinientos millones de años después de la formación del planeta. Para estimar las edades de las estructuras orográficas marcianas, se cuenta el número de impactos (los cráteres) que presentan; cuantos más haya, mayor edad tendrán. Este método de datación, no obstante, padece de muchas incertidumbres; cuesta distinguir entre calderas volcánicas y cráteres de impacto primarios y secundarios; además, en algunas regiones la erosión no ha dejado rastro de los cráteres. Pero si se confirmase que estos valles de escorrentía no son muy viejos, significaría que Marte tuvo quizás un clima como el de la Tierra durante la tercera parte de su existencia; o más, en el caso de dar con valles recientes.

La presencia duradera de agua líquida en Marte cuenta con otro indicio a su favor: la erosión y la sedimentación, considerables en muchas áreas del planeta. Según los cálculos basados en las imágenes de satélite, el ritmo al que se depositaron y erosionaron los sedimentos durante los primeros miles de millones de años de Marte fue un millón de veces mayor que el actual. (Los tiempos de la erosión por el viento se han estimado en los puntos de aterrizaje de los vehículos Spirit, Opportunity y Mars Pathfinder.)

Las estrías y hoyas de la región Meridiani Planum —la superficie de un millón de kilómetros cuadrados donde se mueve Opportunity— indican que la erosión ha arrancado gran parte del terreno y se lo ha llevado a otro lugar. Adónde, no se sabe. Se trata de uno de los misterios a resolver por la investigación de Marte. No obstante, parece claro que el viento solo no pudo excavar tanto material.

En otros lugares, como en los fondos de algunos cráteres y en los suelos y paredes de ciertos cañones y simas de Valles Marineris, se aprecia la acción presumible de diversos ciclos de depósito y erosión, que han creado columnas enormes de cientos de capas de rocas, cada una de entre 10 y 100 metros de espesor. Uno de los ejemplos más representativos se encuentra dentro del cráter Gale, de 170 km de diámetro, que contiene en su suelo una gigantesca mole central de rocas sedimentarias erosionadas y dispuestas en capas. Las capas, los canales y los impactos de cráteres parcialmente soterrados en la mole evidencian una historia larga y compleja de erosiones y depósitos.

El rasgo más llamativo de esa mole estriba, sin embargo, en su altura: sobresale casi un kilómetro del borde del cráter Gale. Parece como si el cráter y las regiones circundantes hubieran quedado enterradas por una enorme cantidad de sedimentos, exhumadas y enterradas de nuevo, y así quizá muchas veces durante largos períodos. Los sedimentos se han ido erosionando desde el último soterramiento, lo que ha expuesto el suelo del cráter, si bien la mole central parece haber disminuido a un ritmo menor, lo que explica que sea más alta que el borde del cráter.

Pero, ¿qué proceso podría haber transportado las cantidades ingentes de sedimentos que enterraron casi toda la región del cráter Gale? Se cree que el fluir del agua ofrece la mejor explicación. El estudio de las velocidades de erosión y sedimentación terrestres indican que el viento podría haber movido parte de los sedimentos marcianos en el pasado (de la misma manera que ocurre hoy día, aunque a un ritmo mermado). Sin embargo, ninguna hipótesis que se base en los vientos explica el transporte rápido de millones de kilómetros cúbicos de material a través de una fracción importante de la superficie del planeta, tal y como debió de suceder en repetidas ocasiones durante la historia primitiva de Marte. Las inundaciones y cursos de agua desplazan, en cambio, cantidades gigantescas de sedimentos en la Tierra; podrían haber hecho lo propio en el planeta rojo.

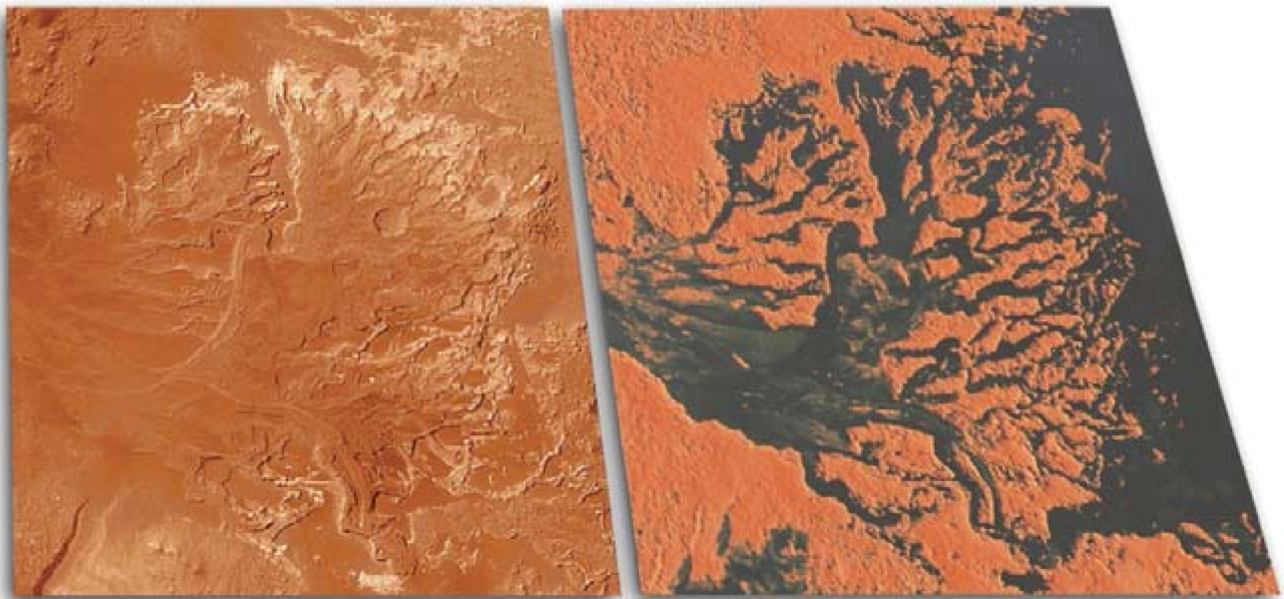
Arcillas, concreciones y olas

No sólo se han observado con detalle las formaciones de la superficie de Marte; se han buscado también huellas de agua líquida en la composición de los minerales del planeta. Una de las razones por las que se pensaba que Marte nunca había disfrutado de un período prolongado de clima cálido y húmedo era la siguiente: una parte extensa de su superficie no cubierta de polvo llevado por el viento consta de un material que no se ha meteorizado, a saber, minerales volcánicos en su estado puro, como el olivino y el piroxeno. Si el agua hubiera fluido largo tiempo sobre la superficie, seguía el argumento, habría alterado químicamente los minerales volcánicos, dando lugar a arcillas y a otros compuestos oxidados e hidratados (minerales que incorporan moléculas de agua o iones de hidróxido en su estructura cristalina).

Pero había que mirar más de cerca. Los nuevos mapas de alta resolución de las naves en órbita y los estudios de superficie *in situ* de los robots han revelado la presencia en muchas regiones de numerosos depósitos de arcillas y de otros minerales hidratados.

El instrumento OMEGA de la Mars Express, de la Agencia Espacial Europea —particularmente apto para la detección de los tipos de minerales creados por la meteorización de las rocas volcánicas— ha hallado arcillas en las partes sin polvo de los terrenos que más antiguos parecen. Por su elevado número de cráteres, las fechas de la creación de esos terrenos deben de comprender la mayor parte, o la totalidad, de los primeros mil millones de años de Marte. Los depósitos de arcilla se encuentran dispersos por todo el planeta, en las superficies volcánicas antiguas y en las tierras altas salpicadas de cráteres, algunas de las cuales han quedado expuestas por la erosión en fecha reciente.

Las arcillas que se han detectado hace poco son filosilicatos, minerales formados por láminas de sílice, con moléculas de agua e iones de hidróxido atrapados entre las láminas. Presentan en su composición la variedad que sería de esperar si su origen guardase relación con la alteración, por acción del agua, de los distintos tipos de roca volcánica hallados en Marte. Aunque OMEGA apenas lleva rastreado con alta resolución una pequeña fracción del planeta, el descubrimiento de tales minerales constituye una prueba importante de la existencia de condiciones terrestres duraderas en los comienzos del planeta.



2. EL ABANICO DE EBERSWALDE (*izquierda*), fotografiado desde su órbita marciana por el Explorador Global de Marte, se encuentra al final de una red de valles que se dirigen hacia el cráter Eberswalde. Canales serpenteantes y superpuestos se entrecruzan en los diez kilómetros de anchura del abanico: debió de ser el delta de un río que desembocaba en un lago somero, que llenó buena parte del cráter. El dibujo de la derecha ilustra cómo podría haber sido el delta hace miles de millones de años.

NASA/JPL/MALIN SPACE SYSTEMS, INC. (*imagen tomada en órbita*); RON MILLER (*ilustración*)

Se han detectado, además, minerales alterados por el agua (arcillas, óxidos de hierro hidratado y carbonatos) en algunos meteoritos marcianos. Tales meteoritos, rocas expulsadas del planeta rojo por colisiones con cometas o asteroides, acabaron en la Tierra. Se ha propuesto la hipótesis de que la meteorización por acción del agua pudo haberse desarrollado en el subsuelo, habida cuenta de que la mayoría de los meteoritos proceden de la corteza de Marte y no de la superficie. Y como algunos de los meteoritos pueden tener su origen en regiones no muy viejas de la corteza marciana, se sospecha que las corrientes subterráneas existen todavía hoy día. Se pondrá a prueba esta importante hipótesis en futuras misiones a Marte, quizá mediante la búsqueda de fuentes activas o de actividad hidrotérmica. Próximas sondas que aterricen en Marte, robots rodados e incluso misiones tripuladas podrían estar equipadas con perforadoras para explorar las profundidades del planeta.

Los robots de Marte han añadido nuevas piezas al rompecabezas climatológico del planeta rojo. Ocho meses antes del descubrimiento de Paso Robles, mientras comenzaba a escalar las colinas Columbia, Spirit examinó —mediante sus instrumentos identificadores de minerales— una roca con nodulaciones y detectó hematita, un mineral de hierro muy oxidado y común en los terrenos de la Tierra alterados por el agua. Varios meses después, halló indicios de filosilicatos y de goetita, mineral de óxido de hierro que necesita agua para su formación y preserva iones de hidróxido derivados del agua en su estructura cristalina. Las colinas Columbia parecen registrar una antigua interacción entre las rocas y el agua de Marte que no se manifiesta en las llanuras jóvenes y volcánicas exploradas por Spirit al principio de la misión.

Cuando el vehículo alcanzó la cima de la colina Husband y descendió por la otra ladera hasta la cuenca meridional, se encontró con más depósitos de sal subsuperficiales, del estilo de los de Paso Robles. Por desgracia, no pudimos estudiar adecuadamente los más extensos. El segundo invierno marciano de Spirit se echaba encima; tuvimos que enviar el robot a cuestas septentrionales, donde llegaba suficiente luz a los paneles solares que abastecen de energía a la máquina. Si todo marcha bien, dirigiremos el robot hacia los depósitos de sal en cuanto regrese la primavera marciana.

Mientras tanto, Opportunity ha realizado descubrimientos no menos impresionantes en Meridiani Planum. A las pocas semanas del aterrizaje, halló depósitos antiguos de rocas sedimentarias y laminares afloradas, porosas, hidratadas y saladas. Sumando las observaciones complementarias de los satélites, se sabe que estos depósitos se extienden por toda la región. Los afloramientos laminares estudiados por Opportunity muestran que este tipo de rocas sedimentarias se extiende hasta profundidades de decenas de metros, o más. Parece, pues, que en la superficie hubo agua líquida durante largos períodos de tiempo.

Los resultados del Opportunity, sin embargo, retratan una parte diferente de la historia del agua en Marte. Las rocas hidratadas encontradas por el vehículo contienen sobre todo minerales ricos en azufre, como la jarosita, y los afloramientos de rocas sedimentarias son ricos no sólo en azufre, sino también en cloro y bromo. Todos estos elementos, móviles en soluciones acuosas, nos indican que los depósitos se formaron tras la evaporación de agua líquida salada. Por tanto, los afloramientos podrían ser los testigos de un tiempo en que las lagunas y corrientes de Meridiani Planum mermaban y se secaban.

Que en los afloramientos el robot descubriese granos esféricos de tamaño milimétrico con hematita refuerza también la hipótesis de la presencia prolongada de agua en la superficie de Marte. A esos granos les pusimos el nombre coloquial de “arándanos”; en realidad podrían ser las concreciones de los geólogos, esto es, granos que precipitan de agua con hierro o sal que se evapora. Si la precipitación ocurre con lentitud y homogeneidad suficientes, los granos minerales crecen con forma esférica. En la Tierra, algunas de las concreciones adquieren

tamaños de canicas o pelotas de pingpong; los que se observan en Marte miden de dos a tres milímetros de diámetro, en promedio. En su desplazamiento hacia el sur desde el punto de aterrizaje, el robot fue encontrando concreciones menores; debió de variar la duración del medio húmedo o el ritmo de evaporación del agua.

Opportunity ha fotografiado incluso afloraciones de rocas que parecen conservar las huellas de olas de aguas someras. El mejor ejemplo de estos "conjuntos orlados de lecho cruzado", formados por la interacción entre las olas y los sedimentos polvorientos, se hallaron a principios del año 2006, cuando el vehículo atravesaba la llanura con rumbo sur.

El nuevo modelo

Los hallazgos de los vehículos subrayan la importancia del azufre en Marte; debió de acumularse por la actividad volcánica de las primeras épocas del planeta. El azufre y los minerales con azufre se pueden disolver en el agua; las soluciones resultantes pueden ser bastante ácidas. El agua ácida destruye muchas clases de minerales, especialmente los carbonatos; impide además la formación de otros, como las arcillas.

Por tanto, la presencia de azufre en Marte podría explicar por qué no se haya dado todavía con ningún carbonato en la superficie; podría también ser la razón de que las arcillas se conserven sólo en los terrenos más antiguos. El instrumento OMEGA ha detectado depósitos de azufre en otros puntos de Marte, no sólo en Meridiani Planum; aunque, por lo general, se trata de regiones más jóvenes que las zonas con arcillas. De momento no se ha encontrado juntos arcillas y azufres.

El paradigma que se deduce para Marte es el de un pasado acuoso prolongado. Hubo charcas, estanques, lagos o mares, si no todos a la vez, durante largos períodos de tiempo y estuvieron expuestos a una atmósfera más espesa y templada. Durante los primeros mil millones de años de la historia marciana, el planeta rojo se parecía mucho más a la Tierra. Fue quizás un lugar favorable para el advenimiento y evolución de la vida tal y como la conocemos. Sin embargo, el entorno marciano empezó a cambiar cuando las cantidades de azufre se incrementaron en demasía, las aguas se acidularon y decayó la actividad geológica del planeta. Las arcillas dieron paso a los sulfatos; la lluvia ácida (o algo parecido) siguió alterando las rocas volcánicas y descomponiendo los carbonatos formados con anterioridad. Con el tiempo, la atmósfera se hizo más tenue; tal vez se perdió en el espacio cuando se apagó el campo magnético del planeta, quizá fue expulsada como consecuencia de impactos catastróficos o a lo mejor quedó secuestrada en la corteza. Lo cierto es que Marte se convirtió en el planeta frío y árido que hoy día estudiamos.

Tal secuencia de eventos explicaría por qué las rocas volcánicas procedentes de erupciones de los últimos miles de millones de años se mantienen en su estado prístino, sin modificaciones. El material que yace por debajo, expuesto por impactos o la erosión o el paso de los robots, encierra la clave para entender el pasado del planeta.

No todos aceptan esta nueva visión de Marte. Hay preguntas fundamentales aún sin respuesta: ¿cuánto tiempo fluyó el agua en el delta Eberswalde? ¿Durante décadas o durante milenios? ¿Dónde están todos los sedimentos que parece haber arrancado la erosión de Meridiani Planum y de otros lugares, como el cráter Gale? ¿Debióse esa erosión al agua, al viento u otro agente? ¿Cuál es la abundancia global de minerales arcillosos en Marte? ¿Fueron alguna vez un componente principal de la corteza del planeta? Y la cuestión más espinosa: ¿dónde están los carbonatos que tendrían que haberse formado en un medio templado, húmedo y rico en dióxido de carbono? Porque todavía no se los ha hallado en ningún lugar de Marte, ni siquiera en los terrenos más antiguos donde hay arcillas. El agua ácida pudo destruir cantidades ingentes de carbonatos, pero no a todos.

De todos los interrogantes el que encierra mayor interés concierne a la posible existencia de vida en un Marte joven. Y si la hubo, ¿evolucionó a medida que el entorno sufrió el drástico cambio que dio lugar al medio actual? La respuesta depende, en buena medida, de cuánto duraron unas condiciones parecidas a las terrestres. Ninguna de las imágenes, ni cualquier otro dato de los que tenemos entre manos, permite, pese a su relevancia, acotar la duración de la era templada y húmeda. Hemos de reconocer que no conocemos las edades de la superficie marciana. La determinación de las edades absolutas y relativas a partir de la densidad de cráteres de impacto acaso resulte inútil en regiones sometidas a muchos episodios de erosión y soterramiento. Habría que traer a la Tierra muestras marcianas para datarlas por métodos radioisotópicos, o dotar de instrumentos de datación a próximas misiones que visiten la superficie del planeta.

Hasta ese día, las naves en órbita seguirán buscando depósitos de minerales interesantes, para identificar los lugares donde más provecho podría sacarse de los robots rodados que algún día calcularán la duración de la era acuosa del planeta rojo. Los últimos diez años de descubrimientos en Marte suponen sólo un pequeño adelanto de un apasionante siglo de exploraciones robóticas y, con el tiempo, humanas.

El autor

Jim Bell, astrónomo, se dedica al proyecto y control de instrumentos incorporados en robots exploradores, para luego analizar sus resultados. Docente en la Universidad de Cornell, colabora en las misiones: Mars Pathfinder, NEAR, Mars Odyssey, Mars Exploration Rover, Mars Reconnaissance Orbiter y Mars Science Laboratory. Es el científico jefe de las cámaras Pancam de Spirit y Opportunity.

Bibliografía complementaria

EVIDENCE FOR PERSISTENT FLOW AND AQUEOUS SEDIMENTATION ON EARLY MARS. M. C. Malin y K. S. Edgett en *Science*, vol. 302, págs. 1931-1934; 12 de diciembre, 2003.

EVIDENCE FOR PRECIPITATION ON MARS FROM DENDRITIC VALLEYS IN THE VALLES MARINERIS AREA. N. Mangold y col. en *Science*, vol. 305, págs. 78-81; 2 de julio, 2004.

NEW PERSPECTIVES ON ANCIENT MARS. S. C. Solomon y col. en *Science*, vol. 307, págs. 1214-1220; 25 de febrero, 2005.

GLOBAL MINERALOGICAL AND AQUEOUS MARS HISTORY DERIVED FROM OMEGA/MARS EXPRESS DATA. J.-P. Bibring y col. en *Science*, vol. 312, págs. 400-404; 21 de abril, 2006.

El estudio de cómo huyen de los gatos las ratas arroja luz sobre el modo en que se traducen en información las tormentas de impulsos eléctricos que barren el cerebro

En busca del

Miguel A. L. Nicolelis y Sidarta Ribeiro

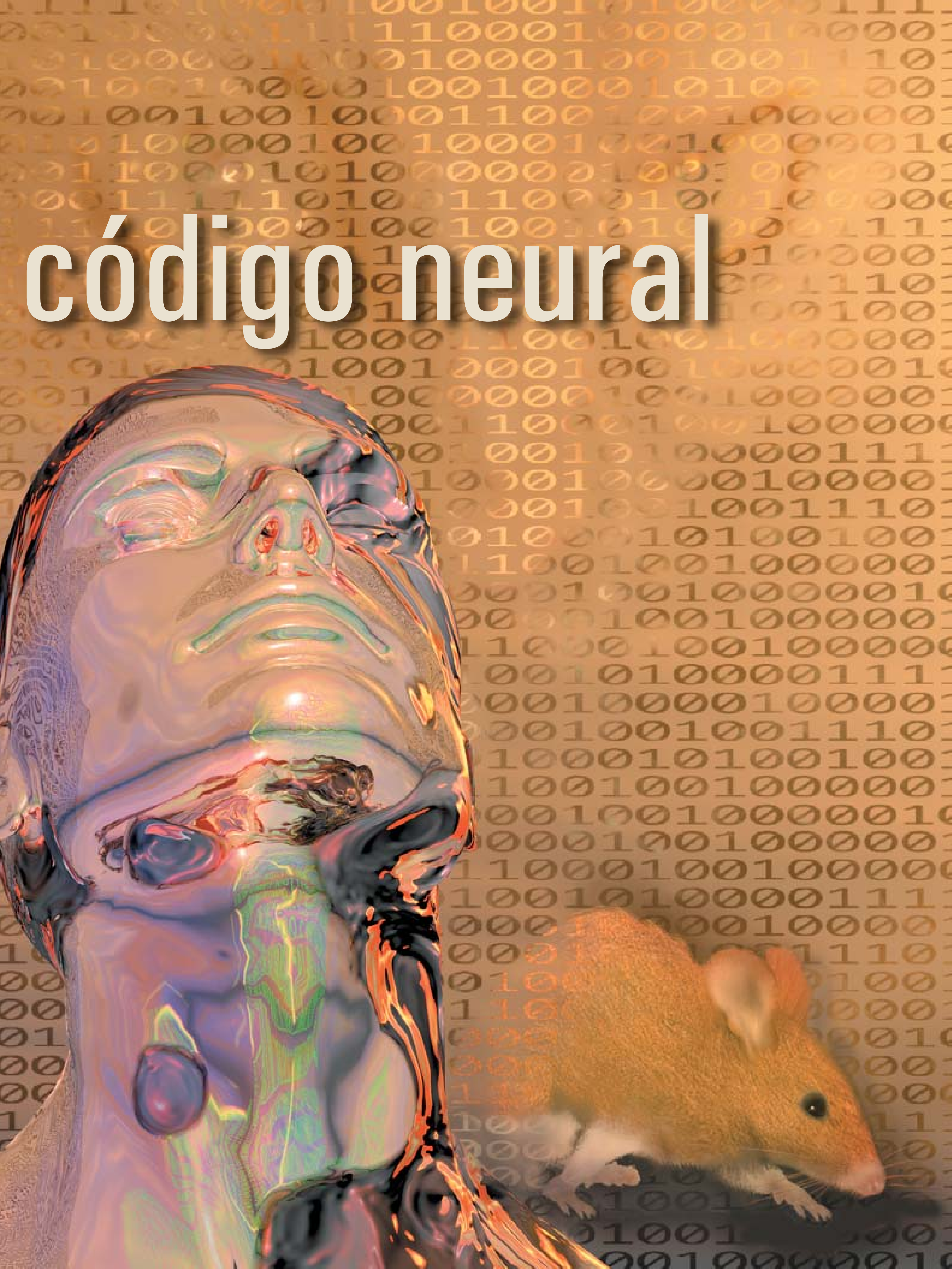
Las puertas correderas, controladas por ordenador, se abrieron de pronto. Dejaban ver una cámara negra como la brea, que Eshe conocía bien. Esta hizo exactamente lo que se esperaba de ella después de tantas y difíciles semanas consagradas a su entrenamiento. Sin dudarlo un instante —y, a buen seguro, contando con la recompensa que tenía la certeza de recibir en vista del excelente trabajo que había realizado últimamente—, se lanzó al interior del estrecho espacio, yendo a toda velocidad hacia la pared de enfrente. Estaba presta para una lucida exhibición de destreza.

La prueba comenzó en el momento mismo en que Eshe atravesó un haz infrarrojo situado ante una abertura ubicada en la trayectoria de su carrera. La abertura estaba flanqueada por los bracitos de dos barras en forma de T, que sobresalían de cada costado de la cámara; definían un paso estrecho por donde Eshe tenía que colarse para llegar hasta la pared de enfrente. La tarea distaba de ser trivial: en la oscuridad más completa debía estimar con celeridad suma, y en un solo intento, el diámetro de la abertura. Para que todo fuese más complicado e interesante, el tamaño de la abertura cambiaba al azar de cada prueba a la siguiente. Al no poder ver las barras, Eshe tenía sólo una forma de lograr su objetivo: fiarse de su exquisito sentido del tacto.

Ante el asombro de los investigadores, Eshe discriminaba correctamente en un 90 por ciento de los ensayos si la abertura era más ancha o más estrecha que la vez anterior, aunque la variación del diámetro hubiera sido de sólo un par de milímetros. Resolvía el acertijo táctil en apenas 150 milisegundos, con sólo tocar los bordes de ambas barras con las puntas de los prominentes bigotes que emergían de ambos lados de su hocico. La hazaña de Eshe no era baladí desde una perspectiva humana. Aquel de nosotros que hubiera intentado resolver una tarea semejante aplicando a esa misma abertura su barba o su bigote hubiera fracasado lamentablemente.

Pero Eshe era una rata. La base de cada uno de sus bigotes contenía una gran densidad de unos órganos sensoriales periféricos especializados, los mecanorreceptores, que traducen los atributos principales de los estímulos táctiles al lenguaje del cerebro: las señales eléctricas. En las ratas, lo mismo que en las personas, tales señales eléctricas son transportadas por una multitud de nervios periféricos que pasan por el cuerpo y llegan hasta una pléyade de estructuras cerebrales interconec-

código neural



tadas en un vasto circuito neuronal, el sistema somatosensorial, base de nuestro amplio repertorio de sensaciones táctiles. Este circuito extenso contribuye también a la génesis de nuestra experiencia perceptiva más íntima: el sentido de nuestro yo.

Sin embargo, la forma exacta en la que el cerebro traduce un lenguaje de impulsos eléctricos en tales percepciones delicadas ha venido siendo desde antiguo un profundo misterio; su determinación, la búsqueda de uno de los "santos griales" de la neurociencia. Si esta clave cerebral se descodificara, se abrirían las puertas para comprender la esencia de quienes somos. Nuestras facultades de hablar, de amar, odiar y percibir el mundo que nos rodea, así como nuestros recuerdos, nuestros sueños e incluso la historia de nuestra especie, emergen de la combinación de una multitud de diminutas señales eléctricas que se difunden por el cerebro, lo mismo que una tormenta eléctrica llena de relámpagos el cielo de una noche de verano.

Un primer modelo lineal

Eshe, sin saberlo, había estado participando en un experimento ideado para investigar esa cuestión crucial. Que optase por utilizar sus bigotes faciales para resolver la tarea era justamente lo adecuado. Cuando una rata escapa de un gato, y necesita pasar a toda velocidad a través de una abertura de tamaño incierto situado en la pared de un lugar oscuro y desconocido, sus bigotes le ofrecen la mejor esperanza de éxito.

Los mecanorreceptores de una rata traducen cada una de las diminutas deflexiones de las barbas en rápidas secuencias de descargas eléctricas (o potenciales de acción), que indican la ubicación, la intensidad y la duración de los estímulos táctiles. Estos impulsos se transmiten hasta el cerebro a través del sistema trigémino, una red nerviosa que forma parte del sistema somatosensorial, especializada en el transporte y procesamiento de señales táctiles del rostro. Para comprender la forma en que Eshe y otras ratas calculan tan rápidamente el diámetro de una abertura, valiéndose sólo de la información táctil que se genera en sus bigotes, resulta imprescindible, pues, elucidar de qué modo interactúan las vastas poblaciones de neuronas distribuidas por el sistema trigémino al procesar la información sensorial aferente.

Como es obvio, la investigación de este problema no sólo nos revelaría cómo escapan de los gatos hambrientos las ratas aterrorizadas. Los neurofisiólogos llevan más de treinta años estudiando el sistema trigémino de los roedores. Se proponen responder cuestiones fundamentales sobre la naturaleza de la codificación neuronal. Los trabajos de nuestro laboratorio, y de otros muchos de todo el mundo, para descifrar tal código ilustran la impresionante evolución que han sufrido los modelos neurofisiológicos desde entonces, así como lo mucho que todavía tenemos que aprender.

Hace treinta años, la teoría preferida por la mayoría de los expertos era el "modelo de línea rotulada". Según ésta, la información sensorial que se genera en la periferia corporal se traslada, mediante multitud de sendas nerviosas paralelas, directamente hasta la neocorteza cerebral. En esencia, el mensaje viajaría a través de un circuito de proalimentación ("feedforward") que conectaría los receptores sensoriales periféricos, como los bigotes faciales, con estructuras cerebrales de orden superior.

Tal paradigma recibió un refuerzo importante durante los años setenta, cuando Tom Woolsey y Hendrik Van der Loos, de la Universidad Johns Hopkins, revelaron las que parecían constituir las líneas físicas de comunicación del sistema trigémino en el seno de la corteza somatosensorial primaria (S1) del cerebro del ratón. Lo mismo que en otros mamíferos, cabe dividir la corteza cerebral del ratón en seis estratos, atendiendo en cada uno a la textura distintiva y a la distribución de neuronas. Se numeran de I a VI, desde la capa más externa hacia la más interna. Woolsey y Van der Loos extrajeron bloques de tejido que contenían la totalidad de la corteza S1 de un ratón; obtuvieron finas láminas tangenciales que abarcaban toda la anchura cortical. Tiñeron luego tales cortes para detectar la presencia de citocromo-oxidasa, enzima mitocondrial asociada con una actividad celular intensa.

Con gran sorpresa, Woolsey y Van der Loos encontraron que el estrato cortical IV contenía multitud de racimos de neuronas ricas en citocromo-oxidasa, diferenciados y dispuestos en una matriz bien delineada de filas y columnas. Cada agregado de ésos, en forma de tonel, constaba de millares de neuronas prietamente empaquetadas. En lógica coherencia se llamó "barriles" a cada uno de los agregados y "campo de barriles" a la matriz completa. Más asombroso todavía: este campo de barriles definía un precioso, aunque ligeramente deformado, mapa del hocico del ratón.

Una formación similar de "campo de barriles" se descubrió poco después en la corteza cerebral de la rata. Estudios ulteriores revelaron la existencia de tales mapas topográficos en estructuras subcorticales: entre ellas, el tronco encefálico y el tálamo, donde los agregados se denominaron "barriletes" y "barriloides". Más todavía, en investigaciones posteriores se demostró que apilamientos de estos mapas topográficos ubicados en cada uno de los estratos subcorticales del sistema trigémino vinculaban los receptores sensoriales

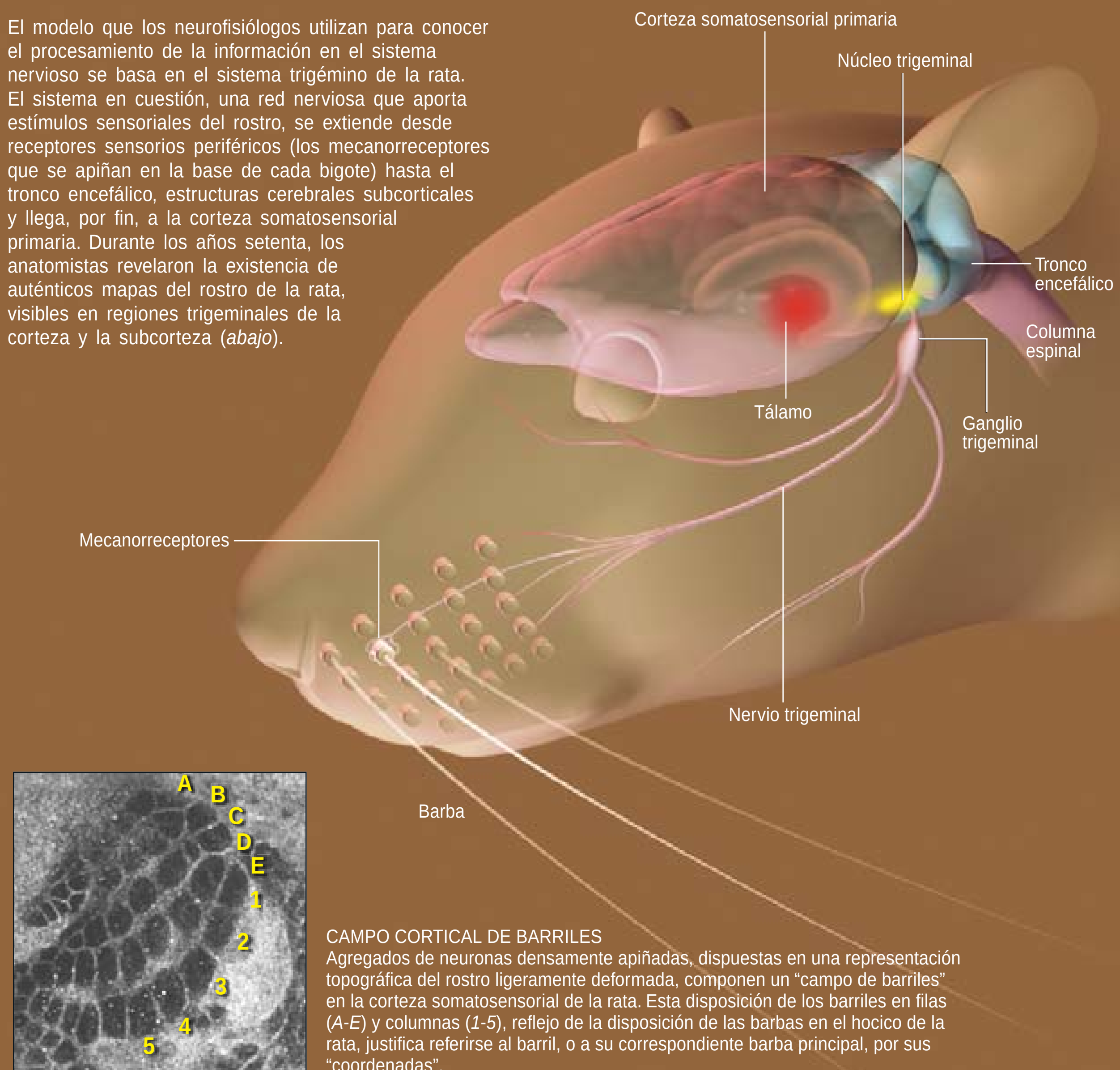
Resumen/*El lenguaje de las neuronas*

- Tormentas de impulsos eléctricos que barren el sistema nervioso central se traducen en sensaciones, emociones y pensamientos. Los neurocientíficos llevan decenios tratando de descifrar ese lenguaje neuronal.
- Las primeras hipótesis sobre la percepción sensorial presumían una transmisión lineal de las señales a lo largo de rutas nerviosas discretas, que iban desde los receptores de estímulos hasta los centros superiores de procesamiento, en el cerebro.
- El estudio de grandes poblaciones de neuronas pertenecientes a las rutas sensoriales ha revelado, en cambio, que la información está codificada en patrones de actividad espaciotemporal de conjuntos neuronales.

PHIL SAUNDERS *Space Channel Ltd. (páginas anteriores)*

RED SENSORIAL

El modelo que los neurofisiólogos utilizan para conocer el procesamiento de la información en el sistema nervioso se basa en el sistema trigémino de la rata. El sistema en cuestión, una red nerviosa que aporta estímulos sensoriales del rostro, se extiende desde receptores sensorios periféricos (los mecanorreceptores que se apiñan en la base de cada bigote) hasta el tronco encefálico, estructuras cerebrales subcorticales y llega, por fin, a la corteza somatosensorial primaria. Durante los años setenta, los anatomistas revelaron la existencia de auténticos mapas del rostro de la rata, visibles en regiones trigeminales de la corteza y la subcorteza (*abajo*).



CAMPO CORTICAL DE BARRILES
Agregados de neuronas densamente apiñadas, dispuestas en una representación topográfica del rostro ligeramente deformada, componen un "campo de barriles" en la corteza somatosensorial de la rata. Esta disposición de los barriles en filas (*A-E*) y columnas (*1-5*), reflejo de la disposición de las barbas en el hocico de la rata, justifica referirse al barril, o a su correspondiente barba principal, por sus "coordenadas".

GARY CARLSON (*ilustración*); CORTESIA DE HERB KILLACKEY, DE "ORGANIZATION OF CORTICOCORTICAL CONNECTIONS IN THE PARIETAL CORTEX OF THE RAT" EN *JOURNAL OF COMPARATIVE NEUROLOGY*, VOL. 181, N.º 3; 1978 (*micrografía*)

periféricos de los bigotes faciales de las ratas en todo su recorrido hasta la corteza S1.

La expresión "campo receptivo" define la cantidad de piel que, al ser estimulada, provoca que una neurona responda con la producción de potenciales de acción. En el caso del sistema somatosensorial de los múridos, la predicción más importante del modelo de líneas rotuladas era que el campo receptivo, o dominio espacial, de una neurona alojada en uno de estos barriles del trigémino estaría restringido a una sola barba o bigote principal.

Pero en las postrimerías de los años ochenta, esta pulcra imagen lineal empezó a verse empañada por resultados contradictorios. Michael Armstrong-Jones, entonces en la Universidad de Londres, registró la actividad de neuronas alojadas en múltiples barriles corticales de ratas anestesiadas. Aunque identificó la barba principal de la mayoría de estas neuronas corticales, demostró también que una neurona individual respondía a la deflexión de barbas que rodeaban a la barba principal.

Armstrong-Jones sugirió que los campos receptivos de las neuronas individuales de la corteza atonelada de la rata no se hallaban confinados a barbas primarias individuales, una conclusión que en aquel tiempo rondaba la herejía. Antes bien, el dominio espacial de las neuronas incluía algunas barbas circundantes, que, al flexionarse, inducían a las neuronas a producir respuestas táctiles más débiles y más lentas, aunque de suma importancia pese a ello. Esta idea bastó para desencadenar una animada controversia, y eso que apenas nos hallábamos en el principio de un decenio de transformaciones en la comprensión del código neuronal.

Computación distribuida

La técnica empleada por Armstrong-Jones para el registro de la actividad de las neuronas, a razón de una por vez, en ratas anestesiadas, se hallaba en cabeza de la época cuando uno de los autores (Nicolelis) y John K. Chapin, hoy en el Hospital Downstate de la Universidad estatal de Nueva York, decidimos aplicar un método nuevo para "escuchar" de forma simultánea la actividad eléctrica de múltiples neuronas individuales.

Nos centramos inicialmente en neuronas alojadas en los barriloides del núcleo medial ventral posterior (VPM); esta estructura comprendida en el tálamo es la fuente principal de conexiones nerviosas ascendentes hacia los campos de barriles de la corteza somatosensorial primaria. Nuestros primeros estudios nos hicieron ver que dichas neuronas VPM estaban asociadas con campos receptivos de gran tamaño, correspondientes a varias barbas. En forma muy parecida a la observada por Armstrong-Jones en la corteza, las respuestas más rápidas y enérgicas de las neuronas VPM se asociaban a la deflexión de la barba principal de cada una, que definía el centro del campo receptivo; la estimulación de las barbas circundantes, en cambio, desencadenaba respuestas más lentas y más débiles.

De hecho, conforme la anestesia se iba debilitando y las ratas terminaron por despertarse del todo, fue aumentando el tamaño del campo receptivo de las neuronas VPM individuales, llegando en ocasiones a abarcar la mayor parte de los bigotes faciales situados en el mismo carrillo.

Además, dado que las neuronas VPM respondían con diferentes latencias, o retrasos, a la estimulación de distintas barbas, el dominio espacial del campo receptivo de cada neurona se desplazaba en función del tiempo postestímulo. Dicho de otro modo, no era posible definir el centro y los contornos del campo receptivo de una neurona *a menos que* se acotara en el tiempo un instante definido.

Este aspecto dinámico espaciotemporal de la respuesta neuronal permitía también que las células reorganizasen con prontitud su reacción inmediatamente después de cualquier variación en el flujo de información táctil procedente de la periferia. El sencillo experimento de anestesiar pequeños parches de la piel del rostro de la rata nos facultó para observar en unos pocos segundos una reorganización completa del campo receptivo de neuronas VPM, con el fin de dar acomodo al nuevo patrón de ingreso de información táctil.

Dimos continuación a estos hallazgos mediante experimentos de mayor dificultad técnica, que entrañaban la supervisión simultánea de muestras de mayor tamaño de neuronas individuales en múltiples relevos corticales, talámicos y del tronco encefálico, pertenecientes al sistema trigémino de la rata. Las grabaciones concurrentes politópicas y polielectródicas proporcionaron muestras simultáneas de hasta 48 neuronas por animal, distribuidas

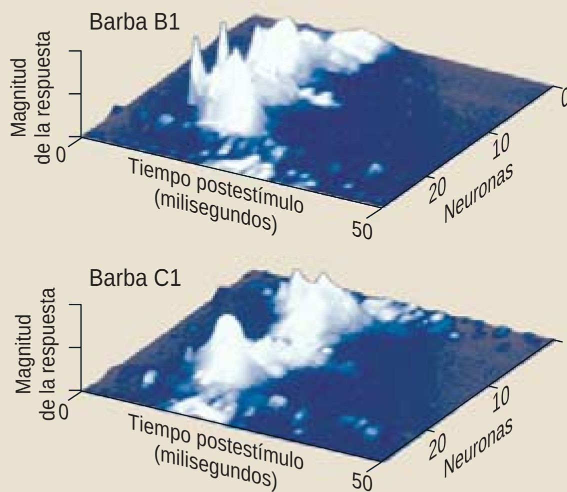
CORTESIA DE *NEURON*, VOL. 18; ABRIL DE 1997 (*izquierda y centro*); MELISSA THOMAS (*abajo, derecha*)

CONVERGENCIA DE SEÑALES

La estimulación de bigotes individuales del rostro de una rata revela una compleja red de reacciones distribuidas por poblaciones de neuronas y a lo largo del tiempo. La información sensorial procedente de una barba individual queda así codificada en el patrón espaciotemporal de las respuestas de una multitud de células repartidas por el sistema trigémino del múrido.

RESPUESTAS NEURONALES POBLACIONALES

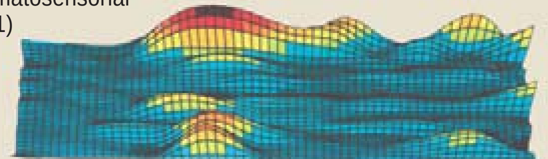
En lugar de responder sólo a una barba principal, 25 neuronas de diversas columnas de barriles corticales reaccionan a la estimulación de diferentes barbas con distintos perfiles de respuesta (*abajo*). Cada fila representa la actividad eléctrica de una sola célula, consecuente a la estimulación de una barba.



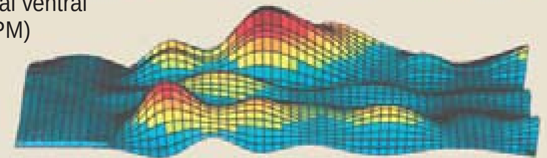
RESPUESTAS NEURONALES GRUPALES

La estimulación de una barba produce ondas de actividad eléctrica en agrupaciones neuronales de forma atonelada contenidos en el tronco encefálico (SPv y PrV), el tálamo (VPM) y en la corteza (S1)

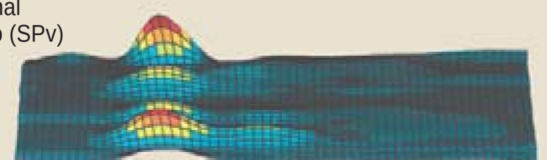
Corteza somatosensorial primaria (S1)



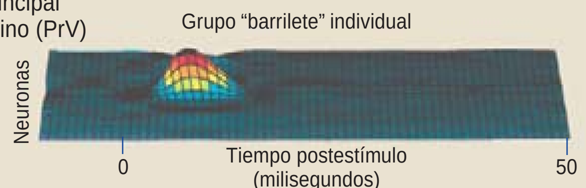
Núcleo medial ventral posterior (VPM)



Núcleo espinal del trigémino (SPv)



Núcleo principal del trigémino (PrV)

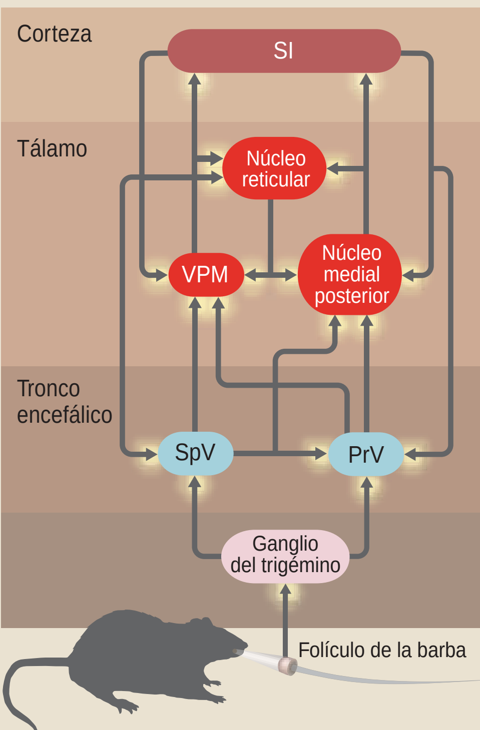


a través de hasta cinco estructuras neuronales.

Era la primera vez que se realizaba un muestreo espacial tan amplio de la senda sensorial de un animal. El resultado fue tan claro cuan asombroso: deflexiones sencillas de una barba en animales despiertos desencadenaban ondas de actividad eléctrica complejas que se extendían a través de múltiples cúmulos atonelados, comprendidos en cada una de las estructuras neuronales alojadas a lo largo del sistema trigémino.

Lo que estábamos observando no era compatible con una transferencia de información que viajase a lo largo de líneas estáticas, segregadas y rotuladas. Nuestros hallazgos sugerían, en cambio, un modelo distinto basado en una "representación distribuida" o un "código neuronal poblacional": sólo mediante la combinación de poblaciones extensas de neuronas individuales podría el cerebro de la rata extraer información táctil precisa y útil acerca del entorno inmediato.

MIGUEL A. L. NICOLELIS



RUTAS DE LAS SEÑALES DEL TRIGEMINO
Las señales táctiles aferentes que proceden de una barba son moduladas por señales nerviosas que viajan entre estructuras cerebrales a lo largo de conexiones laterales y descendentes.

Para verificar de forma más completa esta observación, Asif Ghazanfar, doctorando de nuestro laboratorio, trató de "leer" los mensajes codificados que enviaban las poblaciones de neuronas trigeminales de una rata. A tal fin, Ghazanfar suministraba la actividad de una multitud de neuronas corticales, obtenida mediante la estimulación mecánica de múltiples barbas, a una serie de algoritmos de reconocimiento de patrones, conocidos por redes neuronales artificiales (RNA). Ghazanfar empezó entrenando a un algoritmo para que utilizase las pautas espaciotemporales de excitación de poblaciones enteras de neuronas corticales, con el fin de clasificar la localización de los estímulos procedentes de una sola barba.

Cuando la red neuronal alcanzó un índice de aciertos elevado, introdujo un nuevo conjunto de datos. Midió luego hasta qué punto los algoritmos pronosticaban la localización de una barba estimulada. Cuando a las RNA se les suministraba la actividad de neuronas individuales, aisladas, la precisión de las predicciones dejaba mucho que desear. Pero cuando las redes neuronales disponían de las respuestas combinadas de poblaciones neuronales, los algoritmos pronosticaban, en un solo ensayo, la ubicación correcta del estímulo de una barba.

Por entonces, otros laboratorios estaban obteniendo, a través de medios muy dispares, datos que avalaban nuestros hallazgos electrofisiológicos. Ghazanfar, junto con David Krupa, un becario posdoctoral, demostró que el bloqueo de la actividad neuronal en la corteza S1 afectaba a la respuesta de neuronas VPM en el tálamo. Ello inducía a pensar que las señales descendentes (de retroalimentación) desde la corteza al VPM desempeñarían también una función importante en la modulación de la información ascendente desde el tronco encefálico. Tales resultados, sumados a otros similares, llevaron a nuestro grupo a proponer que las respuestas táctiles sumamente dinámicas correspondientes a múltiples barbas, observadas en las neuronas S1 así como en las del núcleo VPM, estaban determinadas por una multitud de señales ascendentes, descendentes, laterales y moduladoras que convergían en cada



una de estas neuronas en instantes cronológicos distintos.

Nuestros hallazgos nos habían alejado bastante de la teoría de proalimentación estricta, de líneas rotuladas. Persistían, no obstante, sin verificación experimental un número notable de predicciones derivadas de nuestro modelo de convergencia asíncrona. Ello nos llevó a recorrer otra larga jornada, que duró un decenio, en la que procedimos a la estimulación de las barbas de las ratas en una amplia diversidad de formas que nunca se habían ensayado antes.

La importancia del contexto

Erika Fanselow, doctoranda de nuestro laboratorio, diseñó en 1998 una técnica muy sagaz para medir la respuesta de las neuronas S1 y VPM a estímulos táctiles similares, recibidos en condiciones distintas, por ratas con plena libertad de movimientos. Mediante la implantación de un diminuto manguito electródico en torno al nervio infraorbital (la rama del nervio trigémino que procede de las barbas faciales), Fanselow suministraba al nervio secuencias de impulsos eléctricos; al propio tiempo, medía las respuestas de las neuronas de S1 y de VPM. A continuación, midió la variación de las respuestas neuronales durante las diferentes formas de conducta que exhiben las ratas mientras realizan sus rutinas diarias. Cuando las ratas movían las barbas, las neuronas corticales y talámicas respondían a los estímulos táctiles de un modo muy distinto de cuando estos mismos animales estaban despiertos y tranquilos o anestesiados.

En las ratas tranquilas, la respuesta clásica de estas neuronas a los estímulos consistía en una secuencia breve de potenciales de acción, seguida por un período de larga duración cuando esa excitación se inhibía por modificaciones en las membranas celulares. Fanselow descubrió, sin embargo, que

cuando las ratas producían cualquier clase de movimiento en las barbas, las neuronas talámicas y corticales disparaban con mayor regularidad en respuesta a un único impulso eléctrico del nervio, sin ningún período de inhibición.

Esta observación le indujo a tratar de enviar al nervio secuencias de dos impulsos eléctricos, en lugar de uno solo. El resultado fue asombroso. Cuando las ratas estaban despiertas, aunque quietas y sin mover las barbas, las neuronas talámicas y corticales respondían sólo al primero de los dos estímulos de un par; el segundo quedaba enmascarado por la inhibición postexcitatoria. Cuando las ratas movían los bigotes, en cambio, las neuronas S1 y VPM respondían a los dos impulsos eléctricos, incluso cuando estaban separados por un intervalo de sólo 25 milisegundos. La activación de una conducta de movimiento de las barbas cambiaba las propiedades de las neuronas, lo que permitía que la corteza y el tálamo representasen fielmente una secuencia de estímulos táctiles.

Por entonces, Krupa estaba empezando a tener éxito en entrenar ratas en la misma tarea que con tanta maestría iba a ejecutar Eshe dos o tres años después. Este método ofrecía una forma nueva de verificar si las respuestas neuronales serían distintas también cuando la tarea de discriminación táctil que habría de realizar el animal fuese más exigente y significativa (más parecida a la vida real): por ejemplo, en el caso de tener que utilizar los bigotes faciales para juzgar la dimensión, siempre cambiante, de un agujero.

Sus resultados confirmaron y generalizaron las observaciones de Fanselow anteriores: cuando el animal se valía de sus bigotes para determinar el tamaño de la abertura, un gran porcentaje de las neuronas S1 y VPM exhibían respuestas intensas y de larga duración, sin inhibición. Además, varias neuronas de la corteza empezaban a modular la tasa de excitación mucho antes de que los bigotes llegasen a tocar los bordes de las barras, lo que inducía a pensar que el estado conductual del animal repercutía en las propiedades de las neuronas, poniéndolas a punto para la crucial tarea que tenían ante sí.

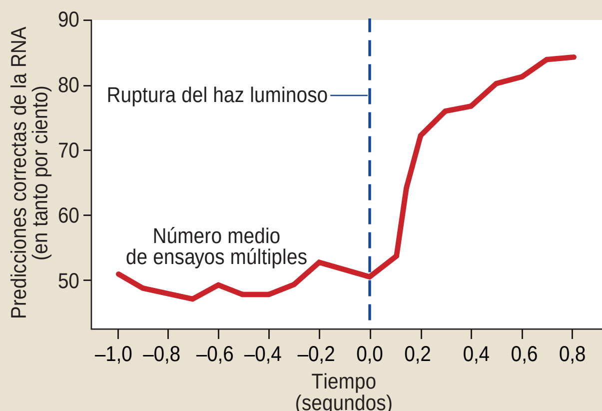
Como demostración final de que estos efectos eran también parte de la información codificada que se proalimentaba y retroalimentaba en el sistema sensorial, Krupa introdujo, en una red neuronal artificial, los patrones espaciotemporales de excitación de las poblaciones de neuronas registrados durante la ejecución de esta tarea. Con la actividad combinada de hasta 50 neuronas corticales, la RNA pronosticaba con fina precisión si las ratas iban a identificar correctamente las dimensiones de la abertura (ancha o estrecha) en un intento dado cualquiera.

Red dinámica

Nuestra capacidad para pronosticar el comportamiento del animal a partir sólo de los patrones de excitación de las neuronas nos facultaba para pensar que andábamos en el buen camino para aprender a interpretar el lenguaje del sistema nervioso. En lugar de fiar sólo en la actividad de neuronas especializadas individuales, o incluso en columnas lineales de módulos atonelados, el cerebro de los mamíferos, para dotar a los animales de sus exquisitas capacidades de

LECTURA DE LA MENTE DE UNA RATA

La capacidad para pronosticar la conducta de una rata demuestra que un algoritmo de reconocimiento de pautas descifra información sensorial codificada en la actividad neural del animal. Cuando a una red neuronal artificial (RNA) se le suministraban grabaciones tomadas del cerebro de ratas participantes en el experimento que vemos a la derecha, la red determinaba si un animal discerniría correctamente el ancho de una abertura. Como era de esperar, los aciertos de la RNA no se distinguían de los del puro azar, antes de que las ratas cortasen un haz infrarrojo a la entrada de la cámara experimental (cero segundos). Después de que los animales empezaron a explorar la abertura con sus barbas (0,1 a 0,25 segundos), la exactitud predictiva del algoritmo aumentó con prontitud.



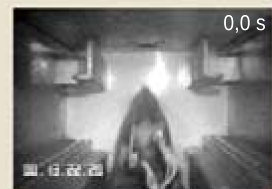
ABERTURA ESTRECHA

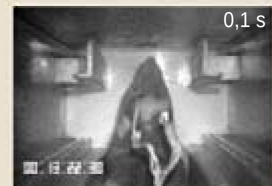


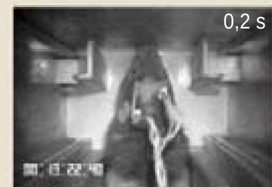




ABERTURA ANCHA







EN EL EXPERIMENTO, una rata utilizaba sus barbas para tantear una abertura formada por dos barras desplazables que flanqueaban a un botón que debía tocar con el hocico. En busca de una recompensa, el animal informaba entonces de su evaluación de la abertura en una cámara exterior, en una de las dos estaciones que fue entrenada a asociar con abertura "estrecha" o abertura "ancha".

MELISSA THOMAS (*gráfica*); FUENTE: DAVID J. KRUPA ET AL. EN *SCIENCE*, VOL. 304, PAGS. 1989-1992; 25 DE JUNIO DE 2004 (*gráfica y fotografías*)

percepción, parecía depender de conjuntos neuronales extensos, constituidos de forma dinámica por células sintonizadas laxamente.

La pertenencia de una neurona individual a estos conjuntos es lábil; cambia de unos momentos a otros. Además, una misma neurona participa de forma simultánea en varios de estos conjuntos. También las propiedades de excitación de una célula individual cambian continuamente de acuerdo con el estado de la periferia sensorial, con las experiencias perceptivas que el animal haya tenido en el pasado, con la dinámica cerebral interna o con las expectativas que tenga respecto del futuro.

Los humanos compartimos con las ratas los mismos rasgos fundamentales en arquitectura, fisiología y biología celular cerebrales. Lo mismo que ellas, navegamos por nuestro ambiente sensorial ayudados por complejas redes neuronales que producen multitud de representaciones del mundo que nos rodea, conformando la percepción momento a momento en una escala diminuta, atendiendo a variaciones de atención, motivación y estado de ánimo y teniendo en cuenta nuestras experiencias sensoriales previas.

Pero, ¿cómo emergen todos estos subproductos a partir de las diminutas descargas eléctricas de miles de millones de neuronas? ¿De qué mecanismos se vale nuestro cerebro para que nos comportemos todos a veces de forma tan parecida y, aun así, nos dote a cada uno de una existencia exclusiva e irreproducible? La mayoría de los neurocientíficos estaría de acuerdo en que los intrincados detalles de tal rompecabezas van a seguir siendo un profundo misterio durante algún tiempo.

Ello no obstante, el trabajo de nuestro grupo, encaminado a descifrar el código neuronal, nos ha permitido ya dar uso práctico a nuestro sucinto conocimiento de este lenguaje: lo hemos utilizado en la lectura de las pautas de excitación neuronal de la corteza cerebral de un mono y en la aplicación de algoritmos informáticos que traduzcan esta información, en tiempo real, en instrucciones para mover un brazo robótico [*véase* "Control cerebral de robots", por Miguel A. L. Nicolelis y John K. Chapin, en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre de 2002].

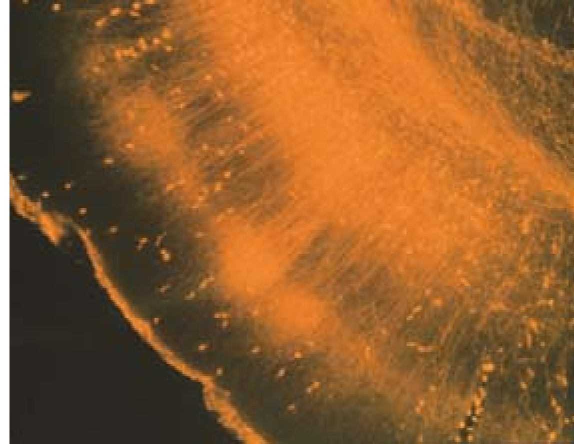
Tenemos la esperanza de que algún día llegaremos a dominar la sintaxis neuronal lo suficiente como para poder hablarle nosotros al cerebro. Ello nos permitiría, por ejemplo, construir un brazo prostético humano repleto de sensores para enviar retroalimentación táctil a la corteza somatosensorial del usuario.

Aunque el código neuronal dista de estar descifrado, sabemos captar, y hablar, unas cuantas de sus sílabas, cosa que no era cierta hace sólo una década. Si somos capaces de ello es debido, en buena medida, a que este idioma presenta una adaptabilidad intrínseca, que emana, a su vez, de las propiedades de comunicación de la red por medio de conjuntos neuronales. El mensaje se comunica y se entiende, aun cuando falten algunas palabras, a la manera en que una red técnicamente robusta compensa presto la pérdida de unos cuantos nodos.

Otra influencia crucial que pesa sobre los avances en este campo ha sido la evolución de los equipos y técnicas experimentales. Hace escasos decenios, los neurocientíficos estaban limitados a registrar neuronas aisladas, mediante electrodos rígidos que dañaban el tejido cerebral si se operaban con violencia. En consecuencia, se veían obligados a estudiar la actividad cerebral mientras el animal estaba anestesiado o, por lo menos, sedado e inmovilizado.

Según demuestra la experiencia de nuestro grupo, en cuanto fue posible auscultar, de forma simultánea, docenas de neuronas repartidas por estructuras cerebrales múltiples, se dispuso de una nueva imagen de la actividad neuronal, no basada en neuronas individuales, sino en sus poblaciones. Nuevos materiales electródicos flexibles posibilitaron la implantación permanente de dispositivos de registro en el cerebro; ello facilita hoy la escucha de la actividad de nada menos que 500 neuronas individuales durante largos períodos y en animales despiertos que desarrollan sus actividades normales.

Tal vez no sea maravilla que la supervisión de neuronas a razón de una por vez fomentase una concepción lineal y neurocéntrica de la comunicación neuronal. Los primeros métodos equivaldrían a la escucha de una sola voz durante la representación de una ópera; por virtuoso que fuera el cantante, resultaría difícil seguir la historia. En cambio, integradas en el seno de conjuntos neuronales grandes y ampliamente repartidos, las interacciones colectivas de estas neuronas proporcionan descripciones precisas del entorno circundante. De este modo, cuando una rata escapa de un gato que se lanza a por ella, lo más probable es que su salvación dependa de una sinfonía de impulsos eléctricos que se está interpretando en su cabecita.



MIGUEL A. L. NICOLELIS

Los autores

Miguel A. L. Nicolelis codirige el centro Duke de neuroingeniería y ocupa la cátedra Anne W. Deane de neurociencia en la Universidad de Duke. Ha sido pionero en el desarrollo de implantes cerebrales multielectródicos para el estudio de la actividad neuronal. **Sidarta Ribeiro** realizó un posdoctorado en el laboratorio de Nicolelis.

Bibliografía complementaria

BRAIN-MACHINE INTERFACES TO RESTORE MOTOR FUNCTION AND PROBE NEURAL CIRCUITS. Miguel A. L. Nicolelis en *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 4, págs. 417-422; mayo de 2003.

LAYER-SPECIFIC SOMATOSENSORY CORTICAL ACTIVATION DURING ACTIVE TACTILE DISCRIMINATION. David J. Krupa et al. en *Science*, vol. 304, págs. 1989-1992; 25 de junio de 2004.

GLOBAL FOREBRAIN DYNAMICS PREDICT RAT BEHAVIORAL STATES AND THEIR TRANSITIONS. Damien Gervasoni, Shih-Chieh Lin, Sidarta Ribeiro, Ernesto S. Soares, Janaina Pantoja y Miguel A. L. Nicolelis en *Journal of Neuroscience*, vol. 24, n.º 49, págs. 11.137-11.147; 8 de diciembre de 2004.

El hallazgo de un extraordinario fósil humano provoca nuevos debates sobre la evolución de la locomoción bípeda

LA HIJA DE LUCY

KATE WONG

Uno de los lugares preferidos por los paleoantrópologos para buscar fósiles es la árida y remota región etíope de Afar. Vivieron allí muchos homininos (el grupo que incluye, a partir de la separación de la línea evolutiva de los chimpancés, a todas las especies biológicas emparentadas con los humanos). Se conoce sobre todo esa zona porque en ella se encontró a “Lucy”, un esqueleto de 3,2 millones de años de antigüedad de una antecesora de los seres humanos, de la especie *Australopithecus afarensis*. Ahora se ha hallado otro esqueleto de *A. afarensis* en el yacimiento Dikika, a apenas 4 kilómetros de donde aparecieron los restos de Lucy. Al contrario que Lucy, adulta cuando falleció, los nuevos fósiles corresponden a un juvenil hembra. Vivió hace 3,3 millones de años (pese a lo que se le ha llamado “la hija de Lucy”).



LA CARA DE LA NIÑA: el esqueleto recientemente descubierto de un *Australopithecus afarensis*, al que se ha dado el nombre de Selam, está más completo que el famoso de Lucy. La mayor parte del cráneo de Lucy no se recuperó; en cambio, la cara de Selam está magníficamente preservada.

MUSEO NACIONAL DE ETIOPIA, ADDIS ABABA

Ninguno de los esqueletos hallados antes, incluyendo a Lucy, se conserva tan completo. Además, es el hominino juvenil más antiguo encontrado hasta la fecha. Por este motivo, el fósil de Dikika nos ofrece una oportunidad sin precedentes de estudiar el desarrollo de nuestros antepasados más remotos. Según Donald C. Johanson, de la Universidad del Estado de Arizona, si Lucy, que él mismo descubrió en 1974, fue el fósil más importante descubierto en el siglo XX, este esqueleto infantil lo es de lo que llevamos de siglo XXI.

Alegrías

Un equipo dirigido por Zeresenay Alemseged, ahora del Instituto Max Planck de Antropología Evolutiva, en Leipzig, descubrió el espécimen de Dikika en la tarde del 10 de diciembre de 2000. Sólo podía verse parte de una cara diminuta; la mayor parte del esqueleto se encontraba en el interior de un bloque de arenisca del tamaño de un melón. No había duda de que se trataba de un hominino porque las cejas resaltaban poco y los caninos eran pequeños, entre otras características similares a las humanas. Pero para completar el estudio había que limpiar el fósil, tarea laboriosa que comportaba eliminar grano a grano, con instrumentos de dentista, el sedimento cementado que lo cubría.

Alemseged tardó unos cinco años en dejar al aire los elementos clave de la anatomía de este fósil; aun así, el sedimento todavía oculta muchos huesos. El hallazgo nos proporciona muchísima información sobre una especie de la que, según la opinión de muchos especialistas, procede nuestro propio género, *Homo*. El pasado 21 de septiembre, Alemseged y sus colaboradores publicaron la descripción del fósil y el estudio de su contexto geológico y paleontológico en dos artículos aparecidos en la revista *Nature*. En la rueda de prensa que convocaron en Etiopía para anunciar el hallazgo, dieron al esqueleto el nombre de Selam, que significa “paz” en varias lenguas etíopes, con la esperanza de promover la armonía entre las diferentes tribus en guerra de Afar.

Consideran que se trata del esqueleto de una hembra de unos tres años de edad. Se conserva el cráneo casi completo, el tórax entero y parte de los brazos y las piernas. Se han encontrado hasta los huesos de las rodillas, no mayores que una macadamia. Muchos de los huesos todavía están articulados. Fósiles de homininos tan completos como éste son excepcionales, y aún más si son de individuos de tan poca edad, de huesos mucho más frágiles. El siguiente esqueleto, en antigüedad, de un juvenil que se haya conservado tan completo es de un neandertal. Sólo tiene unos 50.000 años.

Andar o trepar

La preservación excepcional de Selam, así como de otros fósiles del yacimiento, indica, según el geólogo del equipo, Jonathan Wynn, de la Universidad de Florida del Sur, que una inundación la enterró poco tiempo después de su muerte. No se sabe si murió a consecuencia de esa inundación o justo antes.

Aunque Selam sólo tenía tres años de edad, ya muestra los rasgos característicos de su especie. Se distingue claramente del niño de Taung (un fósil infantil hallado en Sudáfrica, de la especie *A. africanus*) porque la mandíbula se proyecta hacia adelante y los huesos nasales son más estrechos. La mandíbula de Selam se parece más a las encontradas en Hadar, el lugar de donde proceden Lucy y otros fósiles de *A. afarensis*.

El esqueleto poscraneal de Selam también presenta la mezcolanza de rasgos que ha generado tantas dudas acerca del modo de locomoción de *A. afarensis*. Parece fuera de duda que *A. afarensis* podía muy bien desplazarse de forma bípeda. Pero en los años ochenta empezó a debatirse si no estaría también adaptado a vivir en los árboles. Esta hipótesis vino de que, si bien presentaba claras adaptaciones a la locomoción bípeda en la parte inferior del cuerpo, en la parte superior conservaba algunos rasgos primitivos oportunos para la vida arbórea; así, tenía los dedos curvados, como para agarrarse mejor a las ramas de los árboles. Algunos opinaban que *A. afarensis* ya tenía un tipo de vida completamente terrestre y que estas características de la parte superior sólo eran herencias evolutivas de sus antepasados arbóreos. En cambio, otros sostenían que si *A. afarensis* había retenido estas características durante centenares de miles de años era porque trepar a los árboles todavía formaba una parte importante de su repertorio locomotor.

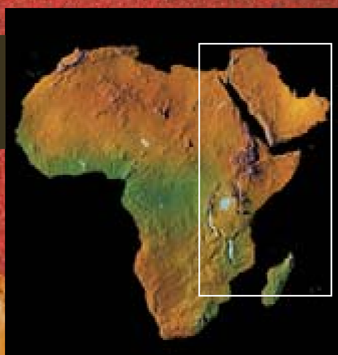
Al igual que los demás miembros de su especie, Selam tenía configurados los dedos de las manos para trepar y las piernas para caminar. En cambio, ha aportado al debate la novedad de sus omóplatos o escápulas, huesos que no se habían encontrado en ningún otro fósil de la especie, Según Alemseged, recuerdan a los de un gorila. Los simios tienen la fosa de la escápula orientada hacia arriba; en los humanos mira hacia los lados. La orientación hacia arriba quizá facilitase la elevación de las manos por encima de la cabeza, como hacen los simios al trepar (aunque los gorilas adultos no se suben a los árboles, sí lo hacen de jóvenes).

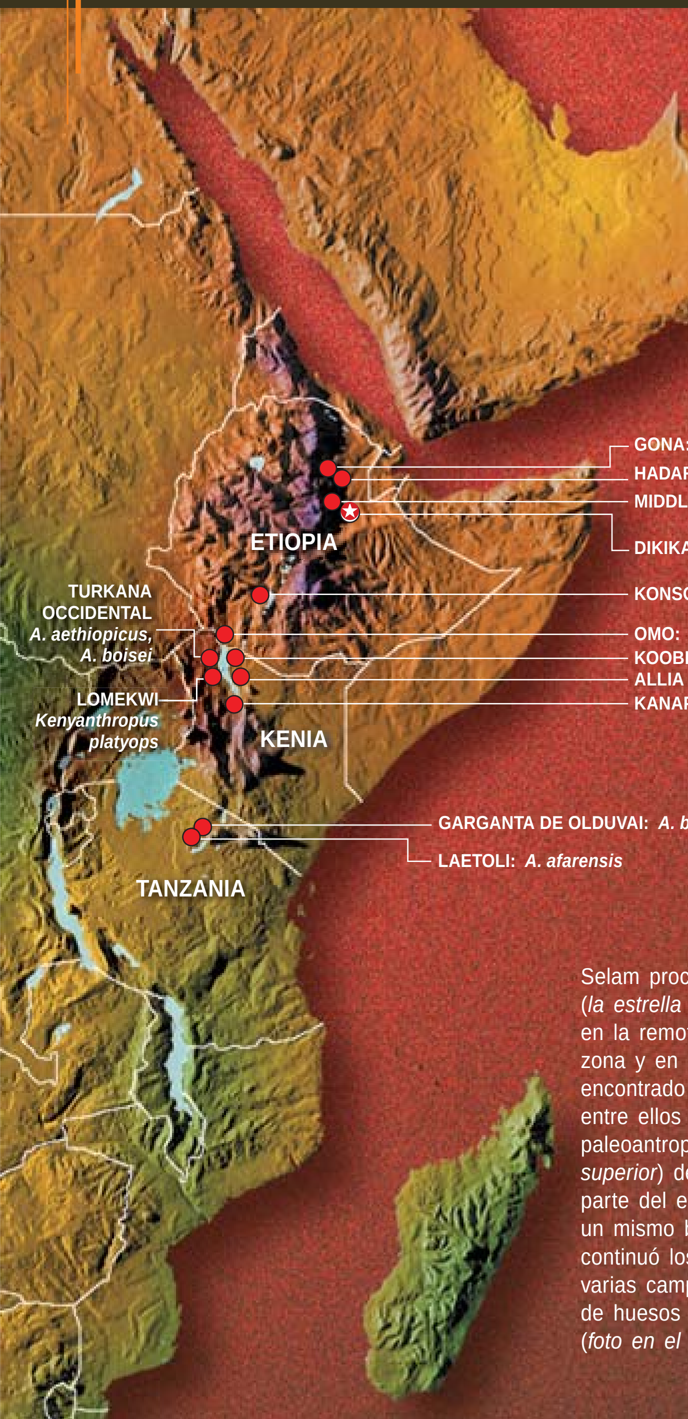
En el oído interno de Selam se pueden encontrar más indicios de sus tendencias arborícolas. Con imágenes de tomografía computarizada, el equipo estudió la anatomía de los canales semicirculares, donde se encuentra el órgano del equilibro. Se asemejaba a la de los gorilas, chimpancés y *A. africanus*. Deducen que cuando se desplazaba de forma bípeda *A. afarensis* no era tan ágil

Resumen/*La niña más antigua*

- Se han encontrado en el noreste de Etiopía los restos fósiles de una hembra inmadura de *Australopithecus afarensis*, especie, se cree, antepasada de la nuestra.
- Este esqueleto, asombrosamente completo, tiene 3,3 millones de años de antigüedad. No hay individuo infantil más antiguo en el registro fósil.
- Este espécimen, que conserva huesos que faltaban en los demás fósiles de *A. afarensis,* proporciona nueva información sobre el origen de la locomoción bípeda.
- La niña de Dikika puede también documentar la forma y el orden en que las diferentes partes del cuerpo cambiaron a lo largo de la evolución humana.

Toda la vida











Selam procede del yacimiento Dikika (*la estrella en el mapa*), que se encuentra en la remota región etíope de Afar. En esta zona y en otras de Africa oriental se han encontrado fósiles importantes de homininos, entre ellos Lucy (*véase mapa*). El equipo del paleoantropólogo Zeresenay Alemseged (*foto superior*) descubrió el nuevo fósil. La mayor parte del esqueleto se encontró dentro de un mismo bloque de arenisca, pero el equipo continuó los trabajos en el yacimiento durante varias campañas de excavación, en busca de huesos que se hubiesen desprendido. (*foto en el centro e inferior*).

EDWARD BELL (*mapa*); DENNE REED *Universidad de Texas en Austin (arriba y abajo)*; JONATHAN G. WYNN *Universidad de S. Andrews (centro)*

ni rápido como los humanos actuales. También puede indicar que le costaba disociar los movimientos de la cabeza y del torso, acción fundamental para la capacidad de nuestra especie de correr largo tiempo.

La conclusión de que *A. afarensis* fue una especie bípeda, pero con la parte superior del cuerpo parcialmente adaptada a vivir en los árboles, se asemeja a la que Jack T. Stern, de la Universidad de Stony Brook, y sus colaboradores alcanzaron hace algunos años acerca de Lucy y su especie. Stern considera los nuevos resultados una vindicación de los suyos. Johanson, antes defensor incondicional del bipedismo estricto de *A. afarensis*, admite que con los nuevos descubrimientos no cabe ya descartar la posibilidad de que conservaran algunos hábitos arborícolas, como trepar en busca de alimentos o refugiarse en los árboles durante la noche para dormir.

Esta combinación de locomoción bípeda y ciertos hábitos arborícolas encaja bien con el ecosistema donde

Un esqueleto extraordinario

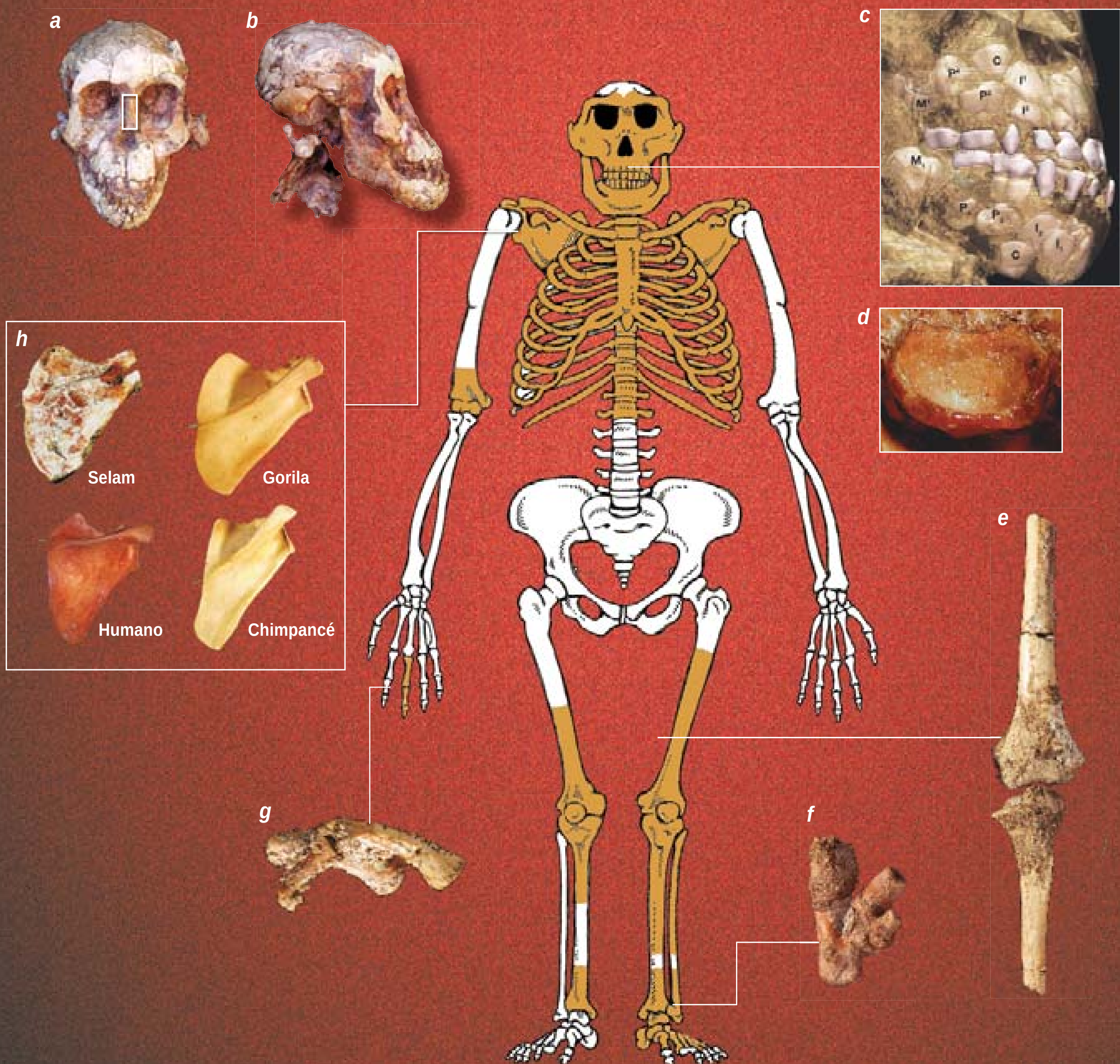
De los primeros homininos, pocos esqueletos se han hallado más completos que el de Selam, aunque muchos de sus huesos todavía están parcialmente cubiertos de sedimento. En el dibujo inferior, basado en un individuo adulto de *A. afarensis*, aparecen en color naranja los huesos que se conservan.

Algunos rasgos de la cara de Selam, por ejemplo los huesos nasales pequeños y estrechos (*a*), son típicos de la especie *A. afarensis* y difieren de los del semejante *A. africanus*. Aunque falta buena parte de la cavidad craneal, la morfología cerebral se reconoce gracias al molde natural de arenisca que se formó en el interior del cráneo (*b*). El tamaño del cerebro parece indicar que en *A. afarensis* se desarrollaba más despacio que en los chimpancés, característica que compartiría con los humanos actuales.

La tomografía computarizada muestra que, además de los dientes de leche, este individuo tenía la dentición permanente formándose en el interior de los maxilares (*c*). Entre los huesos hallados destaca uno muy frágil, el hioides (*d*), entre la lengua y la laringe. Es sólo el segundo hioides de hominino que se ha hallado (el primero pertenece a un esqueleto de neandertal de 60.000 años de antigüedad). Su morfología da a entender que *A. afarensis* tenía capacidades fonatorias similares a las de un chimpancé.

Al igual que otros fósiles de *A. afarensis*, Selam presenta en los huesos de sus piernas (*e*) y pies (*f*) características ligadas al bipedismo. Por ejemplo, su talón es ancho como el de los humanos. Pero la parte superior del cuerpo parece adaptada a una vida en los árboles: los dedos curvos y largos de las manos (*g*) le vendrían bien para agarrarse a las ramas. La fosa de la escápula está orientada hacia arriba, como en un simio, y no hacia los lados, como en los humanos.

No obstante, la escápula es objeto de discusión. De acuerdo con los descubridores, su morfología recuerda a la de un gorila. Pero algunos opinan que se asemeja más a la de los humanos, en particular en las proporciones relativas de las dos depresiones, separadas por una cresta, donde se insertan los músculos.



PATRICIA J. WYNNE (*ilustración*); DE "A JUVENILE EARLY HOMININ SKELETON FROM DIKIKA, ETHIOPIA", POR ZERESENAY ALEMSEGED ET AL., EN *NATURE*, VOL. 443, 21 DE SEPTIEMBRE DE 2006 (*huesos*)

Preguntas

¿Cómo se sabe la edad de Selam?
Por el desarrollo de sus dientes. Comparando con grandes antropomorfos africanos, se calculó que tenía unos 3 años cuando murió. Pero *Australopithecus afarensis* no se desarrollaba como chimpancés y gorilas. De ahí que tal edad sea sólo aproximada.

¿Cómo se sabe de qué sexo era?
Se cree que se trataba de una hembra por las medidas de la dentición permanente. Como estos dientes se encuentran en el interior de las mandíbulas, se tomaron mediante tomografías computarizadas. La comparación de las medidas de los dientes de Selam con las tomadas en fósiles de *A. afarensis* de los yacimientos de Hadar, Laetoli y Maka agrupa al espécimen con las hembras.

¿Cuál es el margen de error al medir la antigüedad de un fósil como Selam? ¿Que técnica se ha utilizado?
Diana C. Roman, de la Universidad de Florida del Sur, ha datado el fósil analizando las capas de cenizas volcánicas cercanas a Selam. Una de las capas se formó antes de su muerte, otra después. La situación del fósil respecto a estas capas ha permitido a Roman establecer una antigüedad de entre 3,31 y 3,35 millones de años (unos 40.000 años de margen de error).

¿Se han utilizado rayos X o técnicas similares para saber cuánto se conserva de los fósiles?
Se cree que se han desenterrado, aunque sea parcialmente, todos los huesos que contiene el bloque de arenisca; no obstante, es posible que algún pequeño hueso se encuentre todavía en su interior. Pero lo que aún se desconoce es si los huesos que se ven parcialmente se conservan bastante completos o no. En el cráneo se han efectuado tomografías computarizadas para observar el desarrollo de la dentición permanente y la morfología del oído interno. Ignoramos si se han hecho exploraciones análogas del resto del fósil.

Pero ¿cuál es el motivo de la polémica? Sabemos que nuestros antepasados descendieron de los árboles en algún momento. Y los niños siguen teniendo una predilección por trepar a los árboles (quizás una reminiscencia inconsciente de nuestro pasado arborícola)
La cuestión es saber hasta qué punto *A. afarensis* estaba adaptado a vivir en el suelo. Nadie sostiene que *A. afarensis* no tuviese la capacidad de subir a los árboles en determinadas circunstancias —al fin y al cabo, como se dice en la pregunta, los humanos actuales todavía podemos hacerlo—; el debate gira alrededor del grado de adaptación a esa actividad. La importancia de este punto radica en que la locomoción bípeda es una de las adaptaciones más importantes de la evolución humana y los paleoantropólogos desean saber con detalle cómo surgió.

¿Existe algún resto de planta o de fósiles de animales asociados a los de* A. afarensis *que nos indiquen en qué tipo de ecosistema vivían?
Los fósiles de animales hallados en Dikika indican que vivía en un ecosistema húmedo pero variado y en mosaico, compuesto de bosques, y herbazales, con fuentes de agua permanentes cerca. En ese tipo de ecosistema vivieron Lucy y otros *A. afarensis*.

¿Qué tipo de ventaja proporciona a una especie poder correr durante largo tiempo sin parar?
Según una hipótesis, la capacidad de correr durante un tiempo prolongado proporcionó a los humanos una ventaja en la caza y el carroñeo; podían así agotar a sus presas o acceder con rapidez a los animales muertos.

debieron de vivir estos homininos, entre ellos Selam. Hoy, Dikika es un conjunto de colinas polvorientas con apenas árboles o arbustos. Pero hace 3,3 millones de años formaba parte de una zona deltaica con abundante agua, rodeada de bosques y herbazales. No extraña que en un entorno así surgiese un "simio" que pasase parte de su tiempo en los árboles y parte en el suelo, dice René Bobe, de la Universidad de Georgia, otro miembro del equipo.

Pero los argumentos a favor de una vida en parte arborícola no convencen a todos. C. Owen Lovejoy, de la Universidad del Estado en Kent, Ohio, pone en entredicho que la escápula de Selam se asemeje a la de un gorila. Aunque primitiva, se parece más, sostiene, a la de un humano. Según Lovejoy, uno de los defensores más prominentes de que *A. afarensis* era completamente bípedo, las características de los brazos que llevan a otros a pensar que *A. afarensis* pasaba parte del tiempo en los árboles sólo prueban que tuvo antepasados arborícolas. Para Lovejoy, el descubrimiento de las famosas huellas de Laetoli en 1978 zanjó la cuestión. No mostraban, argumenta, un dedo gordo del pie prensil; sin él, *A. afarensis* no podía moverse bien por los árboles.

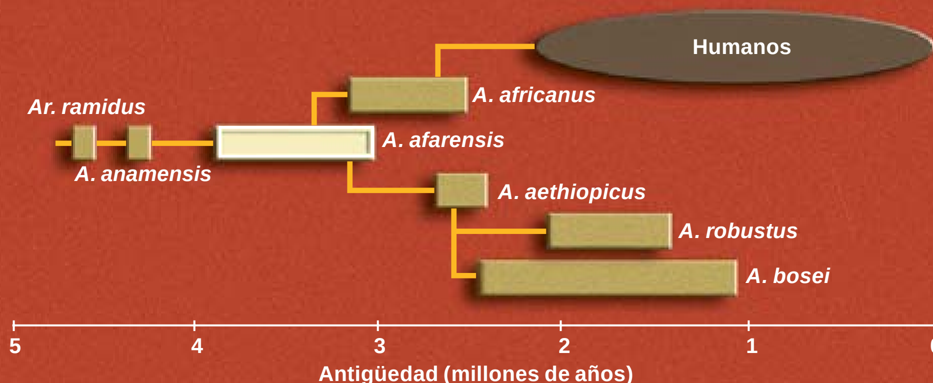
Un hominino mixto

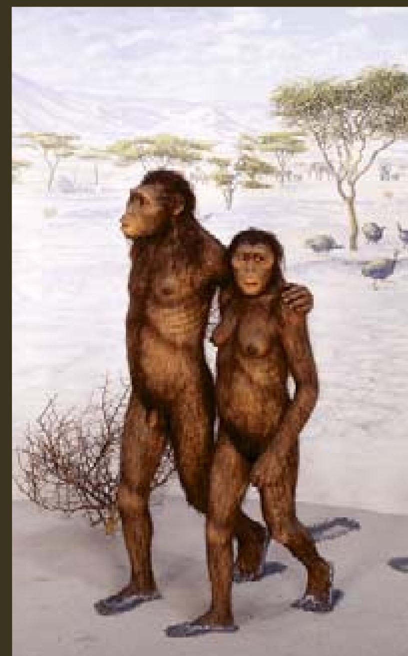
No estarán los expertos de acuerdo sobre el significado funcional de las características simiescas del esqueleto de Selam, pero sí coinciden en que diferentes partes del cuerpo del hominino pudieron sufrir la selección natural en momentos distintos. Para Johanson, *A. afarensis* es un buen ejemplo de evolución en mosaico. "No se puede", comenta, "apretar un mágico interruptor evolutivo y transformar un cuadrúpedo en un humano de locomoción bípeda". Parece que la selección natural actuó primero en favor del bipedismo en las extremidades inferiores y la pelvis, y sólo más tarde afectó a otras partes del cuerpo que no tienen un gran papel en la locomoción bípeda, como los brazos o las escápulas. Ahora, concluye, vamos conociendo mejor la secuencia de cambios que transformó una criatura arborícola de aspecto simiesco en un bípedo terrestre.

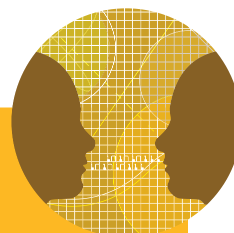
El cráneo de Selam también proporciona pruebas de esta evolución a ritmos diferentes. La forma del hioides,

Un antepasado remoto

***A. afarensis* (*reconstrucción a la derecha*) es sólo una entre las varias especies de australopitecinos que se conocen. No hay un perfecto acuerdo sobre las relaciones evolutivas entre estas especies, pero la mayoría opina que *A. afarensis* fue antepasado de nuestro género (*véase abajo*).**







La opinión de los expertos

Hemos preguntado a diferentes expertos su opinión sobre el hallazgo de Selam. Aquí resumimos sus comentarios.

JOHN HAWKS (Universidad de Wisconsin-Madison) se pregunta si Selam no supondrá el final de un supuesto y polémico género de homininos. En 2001 se publicó el descubrimiento de un cráneo bastante completo y algunos fragmentos de mandíbula y dientes en el yacimiento de Lomekwi (Kenia). Los descubridores asignaron estos fósiles de 3,5 millones de años de antigüedad a un nuevo género de hominino, *Kenyanthropus*. Otros, en cambio, sostuvieron que sólo se trataba de una variedad regional de *A. afarensis*. Selam debería haberse comparado con esos huesos. Sin embargo, es extraño, en el estudio de la criatura de Dikika no aparece ninguna mención a *Kenyanthropus*.

RALPH HOLLOWAY (Universidad de Columbia) tiene la esperanza de que el molde interno del cerebro pueda conservar suficientes detalles del área de Broca y de la región occipital como para que se sepa si tenía el *sulcus lunatus* (una depresión curva en la superficie del cerebro) en una zona posterior. Si fuera así, significaría que el córtex cerebral se había reorganizado ya de una manera más propia de humanos que de chimpancés y gorilas.

C. OWEN LOVEJOY (Universidad del Estado en Kent, Ohio) afirma que el fósil de Dikika, lejos de reabrir el debate sobre el grado de adaptación a la locomoción bípeda de *A. afarensis* y el tiempo que pasaba en los árboles, refuerza la idea de que esta especie tenía una locomoción completamente bípeda. Aunque la escápula se asemeja en algunos rasgos a la de un gorila, también muestra características humanas. Que este individuo de tres años tenga las falanges curvadas indica que se trata de una morfología primitiva heredada de sus antepasados y no una adaptación para agarrarse a las ramas de los árboles, en contra de lo que sostienen los defensores de que su especie llevaba una vida semiarborícola.

RENÉ BOBE (Universidad de Georgia) destaca que uno de los aspectos más importantes de este fósil estriba en que su contexto geológico y paleontológico se puede estudiar detalladamente. Dikika muestra ecosistemas y adaptaciones de los homininos anteriores a los cambios climáticos que provocaron la aparición de las glaciaciones, anteriores a la aparición del género *Homo* y anteriores a las primeras herramientas líticas conocidas. Cuando Selam vivía allí, Dikika era un lugar exuberante, boscoso. Para cuando apareció *Homo erectus*, hace alrededor de 2 millones años, abundaban los herbazales.

WILLIAM E. H. HARCOURT-SMITH (Museo Americano de Historia Natural) mantiene que la morfología de las extremidades superiores de Selam y del oído interno son un fuerte indicio de que *A. afarensis* era una especie parcialmente arborícola. Según él, sería muy interesante estudiar su pie para saber si era capaz de agarrar ramas con el dedo gordo. Su opinión es que las primeras especies estrictamente bípedas fueron las de nuestro género *Homo*.

MELISSA THOMAS (*línea temporal*); MUSEO AMERICANO DE HISTORIA NATURAL, NUEVA YORK (*reconstrucción*)

un hueso muy frágil —pocas veces se conserva— situado entre la base de la lengua y la faringe, indica que *A. afarensis* tenía sacos laríngeos en su garganta; su voz debía de parecerse a la de los chimpancés. Por el contrario, el cerebro muestra algunos rasgos de humanidad. Con el molde natural de arenisca del interior de la cavidad cerebral, el equipo de Alemseged ha calculado que Selam, a sus tres años de edad, sólo había alcanzado entre el 65 y el 88 por ciento del tamaño cerebral de un adulto. En cambio, un chimpancé de la misma edad tiene el 90 por ciento del tamaño cerebral de un adulto. Quizá signifique que el modo en que el cerebro de *A. afarensis* se desarrollaba se parecía más al de los humanos.

Se necesitan más fósiles para saber si este nuevo esqueleto es representativo de la especie *A. afarensis*. Los paleontólogos desearían encontrar otros restos de individuos juveniles de *A. afarensis*, de diferentes edades, y compararlos. Pero la niña de Dikika guarda todavía secretos. Carol V. Ward, de la Universidad de Missouri-Columbia, opina que la importancia de este fósil radica en la información que aporta sobre el crecimiento y desarrollo de *Australopithecus*, no sólo de unos u otros elementos del esqueleto, sino acerca de los diferentes ritmos con que se desarrollan las partes anatómicas de un mismo individuo.

Alemseged cree que se necesitarán algunos años más para completar la limpieza y extracción de los huesos de Selam. Cuando termine, podrá reconstruir un *A. afarensis* de 3 años de edad casi completo.

Bibliografía complementaria

EVOLUCIÓN HUMANA. Temas de Investigación y Ciencia, número 44, 2006.

GEOLOGICAL AND PALAEONTOLOGICAL CONTEXT OF A PLIOCENE JUVENILE HOMININ AT DIKIKA, ETHIOPIA. Jonathan G. Wynn et al. en *Nature*, vol. 433, págs. 332-336; 21 de septiembre, 2006.

A JUVENILE EARLY HOMININ SKELETON FROM DIKIKA, ETHIOPIA. Zeresenay Alemseged et al. en *Nature*, vol. 443, págs. 296-301; 21 de septiembre, 2006.

FROM LUCY TO LANGUAGE. Donald Johanson y Blake Edgar. Simon & Schuster, 2006.

Reproducción de peces

Hidratación del ovocito

En 1891 T. Wemyss Fulton describió los cambios morfológicos que experimentan los ovocitos de peces marinos durante la maduración meiótica, antes de la ovulación y posterior liberación al mar para la fecundación. Uno de los cambios observados era el aumento de volumen. En algunas especies los ovocitos llegan a sextuplicar el volumen inicial.

La investigación ulterior halló que el aumento de volumen se debía a una abundante acumulación de agua durante la maduración. Llegaba hasta un 95 por ciento del peso del ovocito. Se produce, pues, la hidratación del ovocito.

Este mecanismo fisiológico de los peces marinos constituye un proceso de interés ecológico. La acumulación de agua en el huevo disminuye su densidad relativa, lo que favorece la flotabilidad en el mar. La flotabilidad positiva de los huevos hidratados, o huevos pelágicos, resulta esencial para el intercambio de oxígeno en el embrión y para su dispersión en el océano, lo que aumenta su supervivencia.

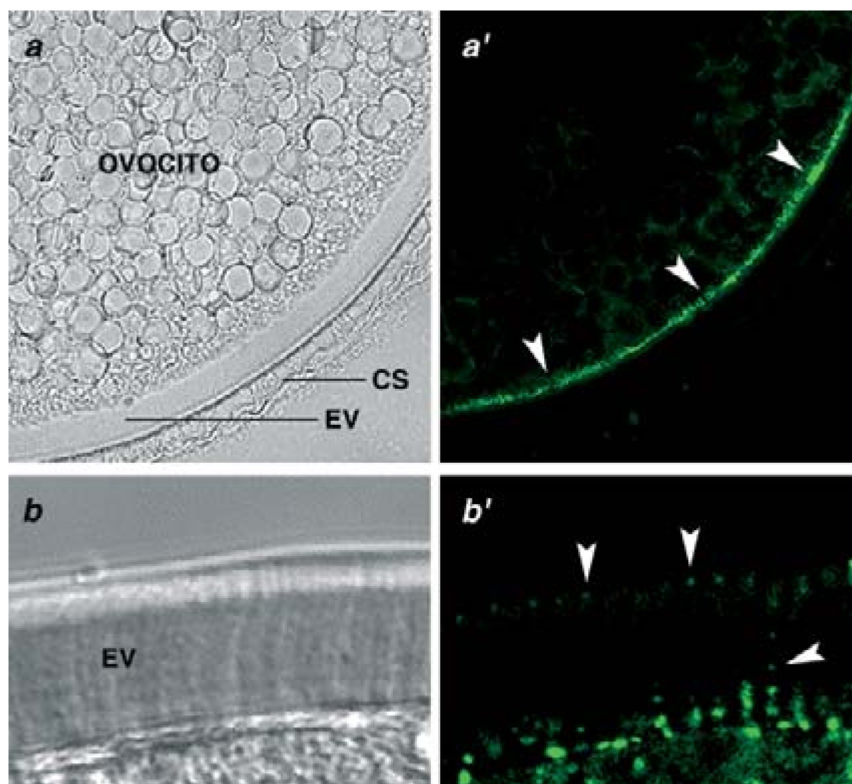
Pese a la importancia ecológica de la hidratación del ovocito, los mecanismos moleculares implicados en el proceso permanecieron ignorados durante largo tiempo. Merced a su intensa investigación en los últimos decenios, sabemos que la captación de agua por el ovocito durante la maduración se debe a un aumento de la presión osmótica causado por la lisis de las principales proteínas del vitelo. El ovocito almacena tales proteínas en la fase de crecimiento en el ovario (vitelogénesis). Durante la posterior maduración meiótica, se activa la proteolisis, con el aumento consiguiente de la concentración de péptidos y aminoácidos libres. El incremento asociado de la presión osmótica del ovocito favorece la entrada de agua.

Hasta hace poco creíase que la entrada de agua en el ovocito de peces ocurría de forma pasiva, como consecuencia del aumento de la presión osmótica. En 2003, Peter Agre, de la Universidad Johns Hopkins de Baltimore, recibió el premio Nobel de química por su descubrimiento de los canales moleculares de agua: las acuaporinas (AQP). Este hallazgo revolucionó el conocimiento sobre los mecanismos moleculares para la regulación del agua celular.

Las AQP transportan agua de forma bidireccional a través de la membrana celular; siempre a favor del gradiente osmótico. Se han identificado hasta trece acuaporinas (AQP0-AQP12); aunque seguimos sin conocer la función fisiológica de un buen número de ellas.

El descubrimiento de las AQP nos ha llevado a investigar su función en la hidratación del ovocito de la dorada (*Sparus auratus*), especie marina que produce huevos pelágicos muy hidratados.

Mediante técnicas de biología molecular, hemos aislado una AQP del ovario de esta especie: la SaAQP1o. Presenta una expresión inusualmente elevada en el ovario y una homología baja con las AQP1 conocidas en vertebrados. Al aplicar anticuerpos contra la SaAQP1o, hemos observado que esta proteína se transporta de una forma pausada hacia la zona cortical del ovocito durante la vitelogénesis; después, justo antes de la maduración meiótica, se encuentra ya



IMAGENES DE MICROSCOPIA CONFOCAL con contraste de fases (*a* y *b*) o inmunofluorescencia (*a'* y *b'*). Muestran el alojamiento de la AQP1o en el folículo ovárico de la dorada, que consta del ovocito, la envoltura vitelina (EV) y las células somáticas (CS). Al terminar la vitelogénesis, la AQP1o (*flechas*) se halla en la zona cortical del ovocito (*a*, *a'*). Durante la maduración e hidratación, la AQP1o aparece en las microvellosidades del ovocito que atraviesan la envoltura vitelina (*b*, *b'*).

en una estrecha zona por debajo de la membrana plasmática. Durante el proceso de maduración e hidratación, cuando se produce la lisis del vitelo y el aumento de la presión osmótica, la SaAQP1o aparece en la membrana plasmática de las microvellosidades del ovocito que atraviesan la envoltura vitelina.

¿Participa ese canal en el transporte de agua? Para averiguarlo, se han realizado estudios *in vitro* con inhibidores de la SaAQP1o (mercurio o tetraetilamonio). Se ha confirmado así la función fisiológica de la SaAQP1o en la hidratación del ovocito de la dorada.

La hidratación del ovocito de peces marinos corresponde, pues, a un mecanismo muy controlado, basado en la lisis del vitelo para la creación del gradiente osmótico y la función de SaAQP1o para el transporte de agua. Nosotros hemos aislado secuencias de ADN similares a la SaAQP1o en otras especies de teleósteos marinos pelágicos.

La AQP1o se define como una nueva subfamilia de acuaporinas en vertebrados que habría evolucionado a partir de un gen *AQP1* ancestral. Durante la evolución, los teleósteos colonizaron los océanos, alrededor del período Jurásico, hace 200 millones de años. Para alcanzar esa hazaña se requirió el desarrollo de mecanismos osmóticos y evitar así la pérdida pasiva de agua en los tejidos impuesta por la elevada osmolaridad del agua marina. Quizá los canales AQP1o en teleósteos marinos correspondan a uno de estos mecanismos. En estas especies se habrían desarrollado moléculas específicas para la supervivencia de los gametos en el medio marino.

Joan Cerdà,
Mercedes Fabra
y Demetrio Raldúa
Laboratorio IRTA-ICM,
CMIMA-CSIC, Barcelona,
y Centro de Acuicultura-IRTA,
Tarragona

Modelización no lineal
del tipo de cambio

Los resultados empíricos obtenidos en los últimos diez años han permitido llegar a un consenso: el uso conjunto de datos y técnicas adecuadas confirma la existencia de las relaciones económicas de largo plazo predichas por la teoría económica. En el campo de los tipos de cambio, este progreso se ha traducido en la búsqueda de los fundamentos, o determinantes a largo plazo, de los tipos de cambio. Así, variables como el tipo de interés real, la productividad, el déficit público o la posición neta de activos extranjeros parecen explicar el comportamiento del tipo de cambio euro-dólar a largo plazo.

Si bien los avances en la modelización del comportamiento en el largo plazo de los tipos de cambio han sido notables, los intentos por explicar su dinámica a corto plazo a partir sólo de los fundamentos macroeconómicos han resultado más bien decepcionantes.

Ya en los años ochenta, las pruebas empíricas mostraban que el tipo de cambio sufre importantes y permanentes desviaciones que no pueden ser explicadas por los modelos estructurales de determinación del tipo de cambio. En concreto, las predicciones del tipo de cambio real que se siguen de los modelos estructurales son inferiores a las obtenidas cuando se toma como modelo un simple "paseo aleatorio", es decir, cuando se supone que el tipo de cambio no depende en absoluto de sus valores pasados y sólo obedece, por lo tanto, al azar.

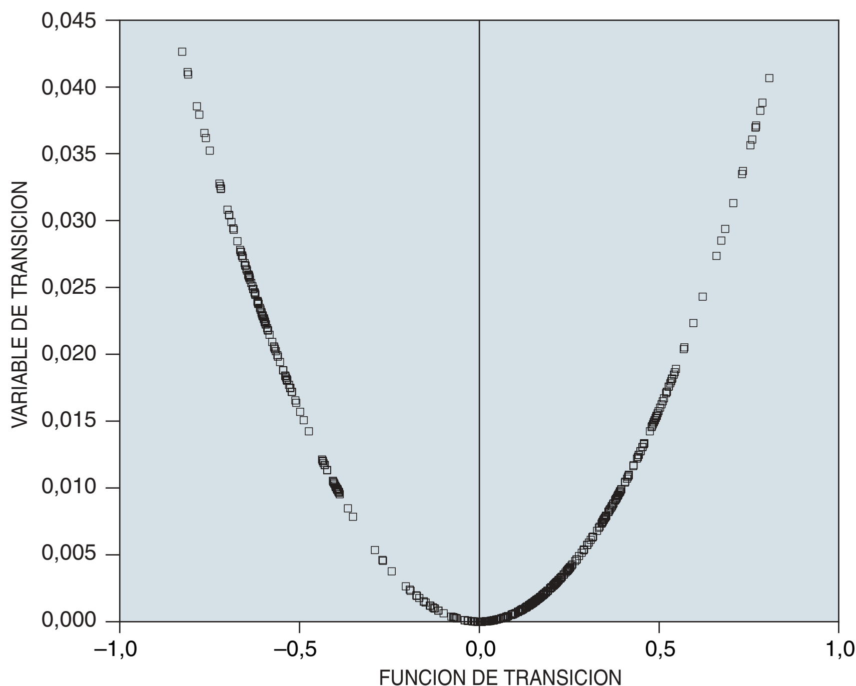
La dificultad de distinguir el tipo de cambio real de un paseo aleatorio, la mayor volatilidad del tipo de cambio nominal con respecto a sus fundamentos o la mayor variabilidad del tipo de cambio real en regímenes de flotación que en regímenes de tipo de cambio fijo, son sólo ejemplos de otros problemas asociados a la modelización del tipo de cambio.

Estos resultados llevan a la conclusión de que los modelos de determinación del tipo de cambio son, en el mejor de los casos, incompletos. Esta afirmación no sorprende, sin embargo, cuando se analiza el tipo de cambio desde la perspectiva del precio de un activo financiero.

Como muchos otros precios de activos financieros, los tipos de cambio muestran comportamientos no lineales, al menos para frecuencias elevadas, esto es, datos diarios y semanales. Si bien las aproximaciones lineales a los fenómenos económicos no lineales han resultado adecuadas en distintas áreas de la macroeconomía, en el caso concreto de los tipos de cambio quizá no resulten útiles. Si es así, el problema no estaría en que no sean válidos los fundamentos teóricos de los modelos de determinación del tipo de cambio, sino en que la contrastación empírica no se hace correctamente. Así, los modelos teóricos proporcionarían las condiciones de equilibrio de largo plazo hacia las cuales los tipos de cambio se aproximarían de forma no lineal.

La metodología no lineal que se viene aplicando en los últimos años con más éxito a la modelización del tipo de cambio es la de los "modelos regresivos de transición alisada" (STR son sus siglas en inglés). Los modelos STR se encuadran dentro de la familia de modelos econométricos no lineales que comprenden el modelo lineal como caso particular.

En la estimación STR, se parte de un modelo de regresión lineal sobre el que se realiza una serie de contrastes (llamados "contrastes de linealidad") para averiguar si la especificación lineal basta para modelizar el comportamiento de la serie temporal objeto de estudio, o si, por el contrario, debe extenderse el modelo de suerte que incluya componentes no lineales. (Un análisis de regresión consiste en predecir los valores de una variable, llamada dependiente, a partir de los valores de una o más variables, llamadas independientes, que se supone causan a la primera. Cuando la relación que liga la variable dependiente con el conjunto de variables independientes es una recta, la regresión se dice que es lineal.) En virtud de esa extensión, en lugar de una recta de regresión hay dos, debiéndose especificar cómo se realiza la transición entre ambas. Cada recta determina una dependencia lineal distinta del tipo de cambio con respecto a las variables fundamentales. (El modelo STR puede interpretarse también como un modelo lineal con



El uso de una función como ésta, exponencial, para la modelización del tipo de cambio real se explica por el hecho de que el comportamiento de esta variable depende no lineal y simétricamente del tamaño de su desviación con respecto a su valor fundamental o de equilibrio. Así, cuanto mayor sea la diferencia entre el valor del tipo de cambio y el de la variable de transición, la reversión del tipo de cambio hacia su valor de equilibrio será mayor. Una función de transición exponencial conlleva de este modo la existencia de dos regímenes distintos para el tipo de cambio, uno de lenta y otro de rápida reversión del tipo de cambio a su valor de equilibrio. Estos regímenes presentan, respectivamente, valores de la función de transición cercanos a cero y uno.

coeficientes estocásticos que varían en el tiempo.)

En el método STR deben determinarse tanto la forma en que la transición se produce como la variable que gobierna tal transición. En la terminología econométrica, se las denomina respectivamente función y variable de transición. La variable de transición puede ser el propio tipo de cambio o cualquiera de sus fundamentos (tipos de interés, productividad, déficit público, etc.), o una combinación de estos últimos.

La elección de una forma funcional concreta como función de transición determinará que el ajuste tenga naturaleza simétrica o asimétrica. Por asimétrico debe entenderse aquí que la variable modelizada reacciona de forma distinta ante incrementos o disminuciones de la variable de transición. No existe ningún motivo para que pensemos que el tipo de cambio reacciona más, por ejemplo, ante una subida que ante una bajada de los tipos de interés, siempre que sean de igual cuantía. Por tanto, a la hora de elegir una función de transición deberá escogerse una que implique un comportamiento simétrico.

Una elección posible es la conocida como función exponencial. Esta función presenta dos regímenes extremos para el tipo de cambio: uno en el que el tipo de cambio se corresponde con sus fundamentos (el valor de la función de transición es cero) y otro en el que el tipo de cambio se sitúa lejos de este valor de equilibrio (la función de transición tiende a uno).

Entre ambos regímenes se observa una transición suave, simétrica para valores por encima y por debajo de sus fundamentales de equilibrio, que además conlleva una reversión del tipo de cambio hacia su valor de equilibrio de largo plazo más rápida cuanto mayor sea la separación entre el valor de equilibrio y el valor desviado.

Los modelos STR, frente a modelos no lineales alternativos, como el de la “heterocedasticidad condicional”, implican un comportamiento del tipo de cambio acorde con la teoría económica. Así, por ejemplo, en los modelos de *zonas objetivo*, con costes de transacción o con agentes heterogéneos que actúan en el mercado de divisas, el tipo de cambio varía de forma no lineal y suave, comportamiento característico de los modelos STR.

El ejemplo más conocido de modelo de *zonas objetivo* lo constituye el Sistema Monetario Europeo. Creado en 1979, funcionó estableciendo unas paridades centrales entre cada par de monedas, de forma que el tipo de cambio nominal podía moverse alrededor de esta paridad, aunque dentro de unas bandas de fluctuación. Cuando el tipo de cambio se acercaba a la banda máxima o mínima de fluctuación, los bancos centrales debían intervenir. La existencia de tales bandas, así como la naturaleza de las intervenciones, daba un carácter no lineal al comportamiento del tipo de cambio en este tipo de modelos.

Los costes de transacción en el mercado de divisas también conllevan comportamientos no lineales. Tales costes introducen unas bandas dentro de las cuales los agentes económicos no deshacen sus posiciones en divisas por el simple hecho de que no obtienen beneficios. Cuando la cuantía de la desviación del tipo de cambio compensa los costes, se producen los ajustes correspondientes.

Finalmente, la existencia de agentes con expectativas distintas sobre la futura evolución del tipo de cambio conduce a comportamientos no lineales en el tipo de cambio, por ejemplo, las que se guían por el valor de las variables económicas fundamentales, o las que intentan predecir cambios futuros a partir de las gráficas de cambios pasados. Expectativas diferentes implican ajustes no sincronizados de las posiciones en divisas, de forma que sólo cuando es muy evidente que una moneda se encuentra muy sobrevalorada o muy infravalorada el mercado actúa en la misma dirección.

JAVIER ORDÓÑEZ
Departamento de Economía,
Universidad Jaume I
Castellón

Emilio O. Casamayor, Anna Hervas, Jorge López Ramos e Isabel Reche

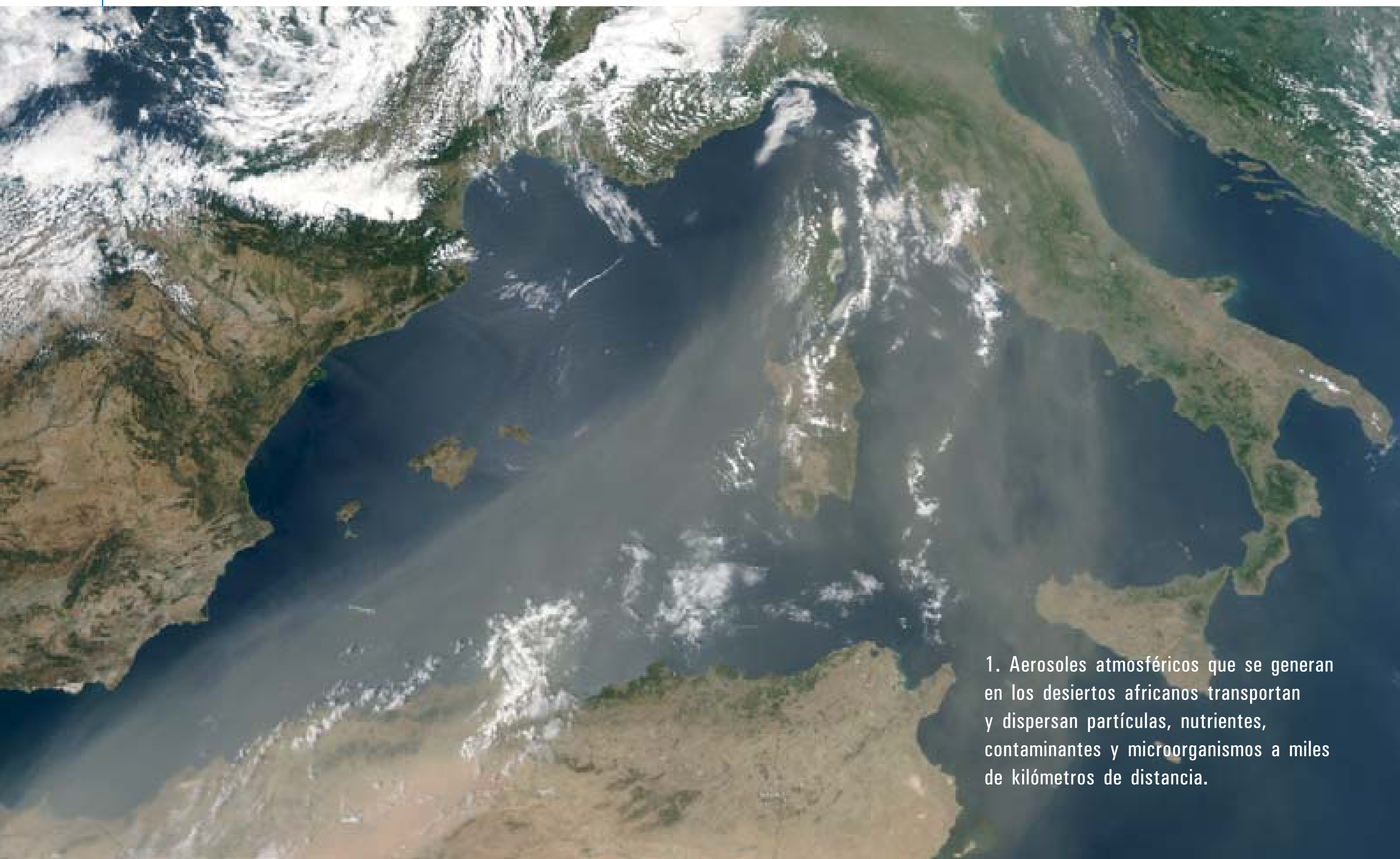
Microorganismos aerotransportados

En los últimos años, la generación de aerosoles atmosféricos se está acelerando por efectos ligados al cambio climático. Bacterias, hongos y virus sobreviven a largos viajes en la alta atmósfera, suspendidos en partículas de polvo y arena de origen africano; el viento los transporta a miles de kilómetros de distancia. Forman inmensas masas de polvo en suspensión; algunas de ellas equivalen al tamaño de toda la península Ibérica. Movilizan anualmente unos 10 trillones de microorganismos, que se reparten por todo el planeta. La magnitud de este fenómeno y sus consecuencias ambientales y para la salud de las personas empiezan a aflorar: plagas, alergias y enfermedades aparecen en fauna y flora que no se encuentran adaptadas a las especies invasoras.

La movilización atmosférica de polvo a escala global supone además el transporte de cientos de millones de toneladas de componentes del suelo. Se ha visto acelerada por la persistente sequía que desde hace más de 30 años azota la zona del Sagel y del Sahara, así como por el crecimiento desmedido de prácticas agrícolas y ganaderas extensivas. Ello ha terminado por desecar extensas zonas acuáticas como el Lago Chad, con la reducción consiguiente de la cubierta vegetal protectora y el aumento de la frecuencia e intensidad de las tormentas de arena. El escaso o nulo control en las prácticas agrícolas y sanitarias en estas regiones africanas y la falta de depuración en los vertidos a ríos y lagos hacen que se movilicen de los sedimentos desecados contaminantes orgánicos, metales pesados y microorganismos patógenos. De las 500 bacterias presentes por litro de aire se han identificado menos del 0,01 por ciento. Se desconocen el efecto y el devenir de los millones de bacterias colonizadoras que acceden en sucesivas y cada vez más frecuentes oleadas a Europa y Estados Unidos.

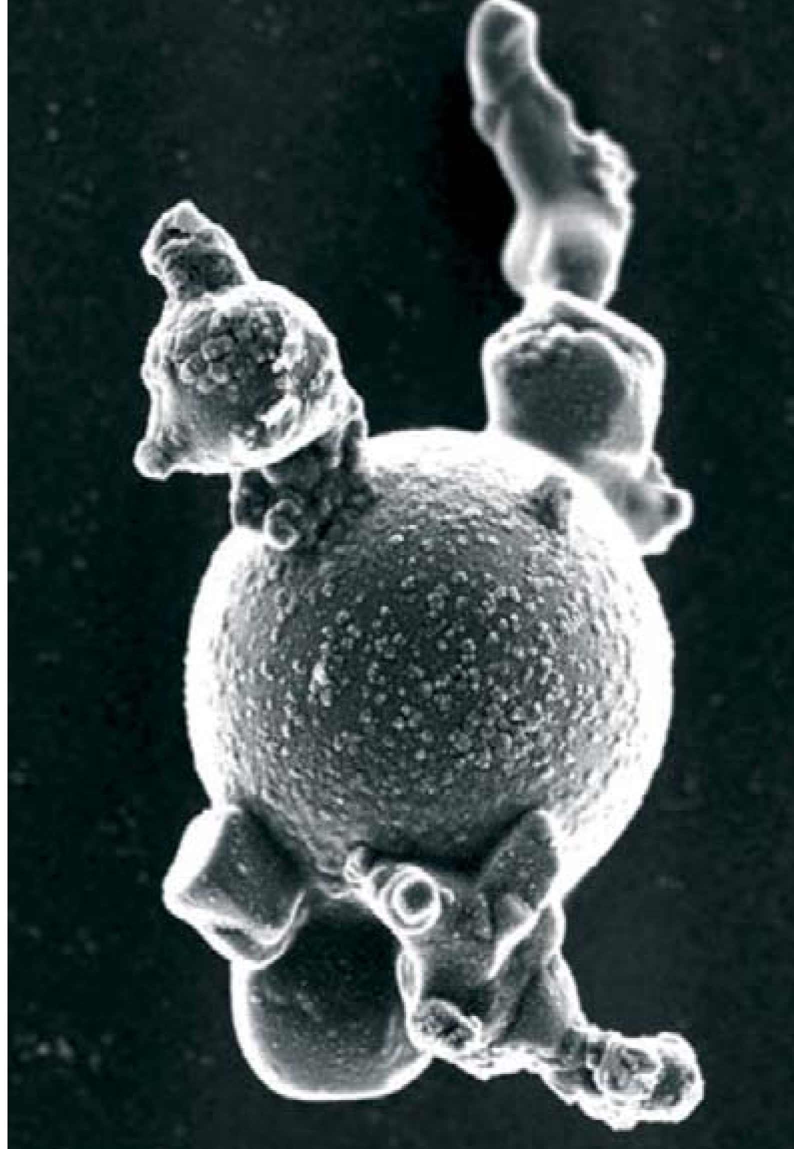
El fenómeno no está pasando inadvertido. Además del seguimiento de las masas de polvo mediante satélite, varios lagos y zonas alpinas operan como centinelas. Estos enclaves, poco alterados por la acción humana local, se consideran libres de interferencias externas próximas. Resultan por ello de suma utilidad para el estudio de la incidencia de microorganismos invasores aerotransportados de origen remoto: ofrecen datos continuos de la calidad microbiológica del aire y de la salud del ecosistema. Una vez más, se demuestra que la gestión del planeta requiere de un planteamiento global y sin fronteras.

JEFF SCHMALTZ, *MODIS Rapid Response Team*, NASA/GSFC



1. Aerosoles atmosféricos que se generan en los desiertos africanos transportan y dispersan partículas, nutrientes, contaminantes y microorganismos a miles de kilómetros de distancia.



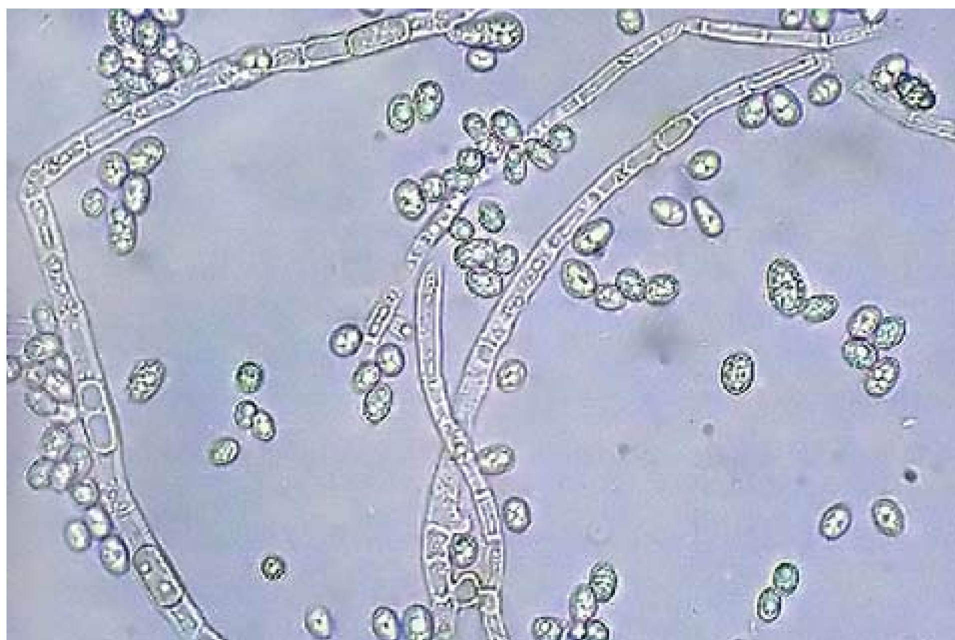


2. Lagos y zonas alpinas de Sierra Nevada, Pirineos y los Alpes operan como centinelas. Mediante sistemas de succión de aire y colectores de precipitación seca se recolectan muestras de polvo atmosférico que avisan de las intrusiones de microorganismos de origen remoto depositados en la superficie.

3. Numerosos microorganismos sobreviven a largos viajes de miles de kilómetros en la alta atmósfera, aerotransportados en partículas de polvo del desierto africano.

U. POSCHL (*arriba, derecha*); B. DEMBOWSKY (*abajo*)

4. Aunque se conoce su existencia desde el siglo XIX, el componente microbiano de los aerosoles atmosféricos no ha recibido la atención merecida hasta principios de la década presente. En la fotografía, hifas y esporas de hongos aerotransportados.



Jeffrey D. Sachs

El desafío del agua sostenible

Las reservas mundiales de agua
no dan para más.
El crecimiento de la población y el calentamiento global
agravarán el problema

Aunque es la escasez de petróleo la que se lleva los titulares, la falta de agua provoca en el mundo tantos o más quebraderos de cabeza. Las condiciones más extremas se viven en Asia, donde los dos mayores países de la Tierra, China e India, deben lidiar con problemas de agua cada vez más serios y sin resolver. La gran llanura del norte de China, habitada por más de 200 millones de personas, es por lo general subhúmeda o árida y depende para su irrigación de un bombeo del agua de acuíferos subterráneos insostenible. Se le saca tanta agua al río Amarillo, que ya no desemboca en el mar. Mientras tanto, el nivel freático de Pekín y de otras grandes ciudades del norte está bajando muchísimo como resultado del bombeo de agua del subsuelo.

Los estados del sur de India son propensos a la sequía. Compiten por el agua de los ríos que pasan de un estado a otro. Cuando las lluvias son escasas, los estados situados corriente arriba, como Karnataka, cortan el caudal a los que se encuentran curso abajo, como Tamil Nadu, con consecuencias brutales para agricultores y comunidades enteras. Al norte de India, igual que ocurre en China, decenas de millones de pozos están agotando el agua subterránea mucho más deprisa de lo que se regenera.

El río Amarillo ya no desemboca en el mar.

Estos problemas, por supuesto, no son exclusivos de países en vías de desarrollo. Existen fuertes disputas entre los estados occidentales de EE.UU., así como entre EE.UU. y México, por la escasez de caudal de los ríos. Una considerable parte de la agricultura estadounidense de las grandes llanuras depende del vasto acuífero de Ogallala, que se está agotando.

El continuo crecimiento demográfico y económico ejercerá aún más presión sobre las reservas de agua dulce. En este momento, las reivindicaciones sobre ríos y acuíferos son a menudo un juego de suma cero: más agua para una región significa aumentar la escasez de agua y la desestabilización ecológica en otra.

El cambio climático incrementará la tensión aún más. En China, India y otras partes de Asia, cientos de millones dependen de ríos que se alimentan del deshielo de los glaciares del Himalaya. Estos glaciares están disminuyendo, y muchos desaparecerán en el siglo iniciado, y con ellos el suministro de agua. Otros cientos de millones de personas dependen, al menos parcialmente, de la nieve fundida. Pero aunque no nevara menos, el cambio climático modificará las fechas de deshielo. Con temperaturas más cálidas, las nieves fundidas llenarán los ríos más temprano en primavera y no podrán abastecer de agua los veranos, largos y secos.

El cambio climático alterará también la pauta de las precipitaciones y la evaporación de un modo que todavía no conocemos bien. Lo más probable es que los lugares secos se sequen aún más, que llueva menos veces y, cuando llueva, lo haga en mayor cantidad, y que se intensifiquen los fenómenos climáticos extremos, como los ciclones tropicales. En el Instituto de la Tierra de la Universidad de Columbia, por ejemplo, han concluido, con razonamientos teóricos y datos del último milenio deducidos de los anillos de los árboles, que es probable que el calentamiento global intensifique las sequías en el oeste norteamericano. Algunos indicios, todavía muy controvertidos, dan a entender que el calentamiento de la superficie del océano Indico está provocando sequías en zonas del oriente africano.

Las soluciones no van a ser sencillas. Es cierto que mejorar la política de precios del agua hará que ésta se utilice de forma más eficiente; que el riego por goteo reduce la demanda agrícola de agua; que la desalinización amplía inmensamente las reservas de agua, aunque a un alto coste energético; que los sistemas de almacenamiento de agua ahorran a los agricultores el suplicio de las malas cosechas. Pero estas medidas presuponen un importante desembolso de capital y no satisfacen automáticamente las necesidades de los pobres, que no pueden correr con tales gastos. Además, muchas veces estas soluciones no se adecuan a la magnitud del problema por las gravísimas consecuencias ecológicas que ello traería.

Garantizarle el agua a un mundo en crecimiento requerirá lo mejor de la ciencia, la ecología, la economía, la ética y la cooperación internacional. El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático ha realizado un trabajo notable al estimular la búsqueda del consenso científico y de posibles soluciones. Un esfuerzo parecido en la ciencia, la técnica y la política del agua podría aportar un beneficio mundial no menor.

Jeffrey D. Sachs es director del Instituto de la Tierra de la Universidad de Columbia y del Proyecto Milenio de la ONU.

LASERES BLANCOS

Robert R. Alfano

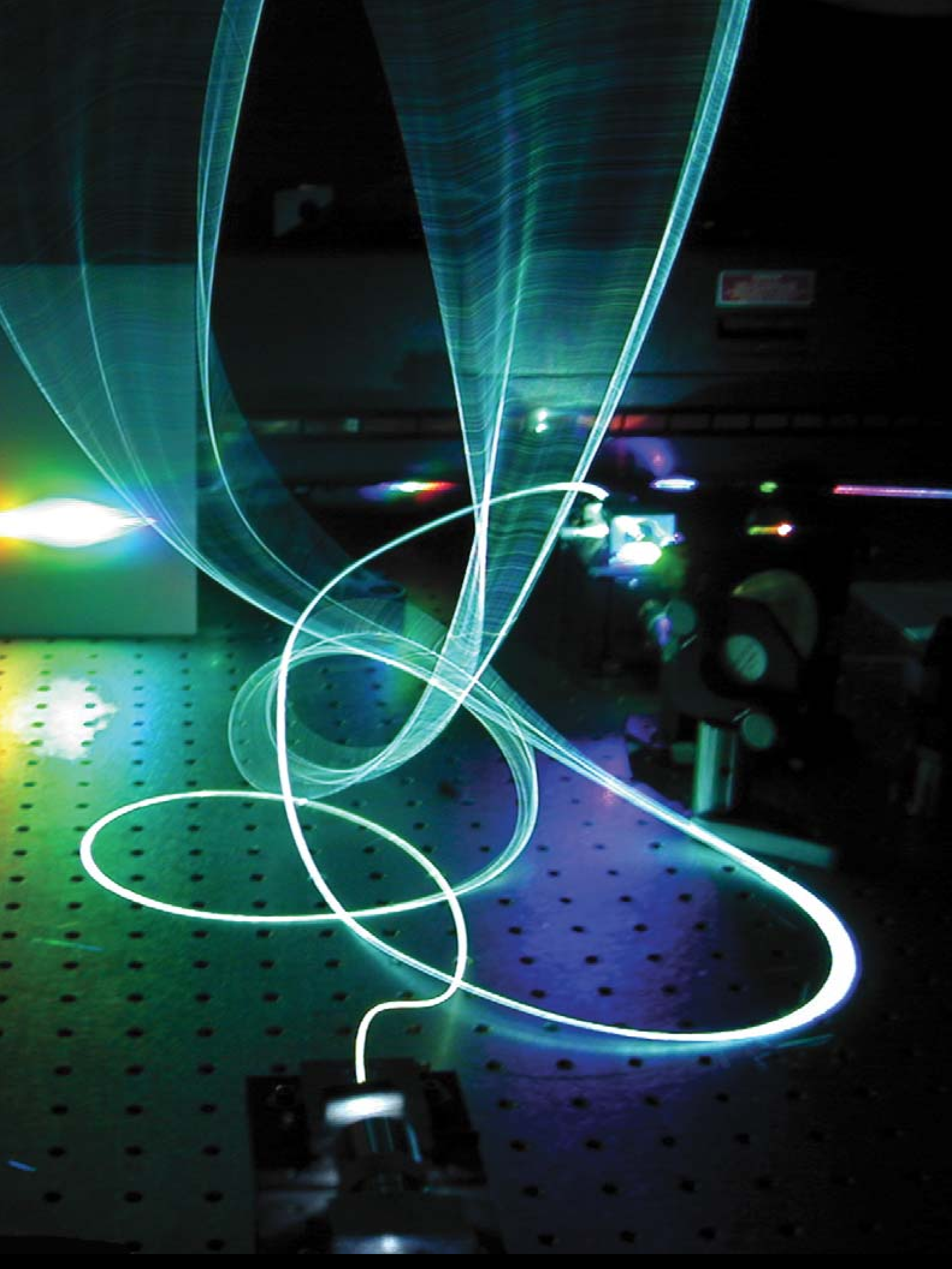
Gracias a la luz de láser supercontinua se miden frecuencias y tiempos con máxima precisión. La transmisión óptica de datos quizás alcanzará velocidades hasta ahora imposibles

La luz es uno de los fenómenos más importantes y versátiles de la naturaleza. A semejanza del correo, transfiere información de un punto a otro. Transmuta la materia como lo haría un alquimista. Inicia y modera procesos esenciales en química, biología y física del estado sólido. Y sin ella no veríamos.

La versatilidad de la luz proviene de la multitud de formas que adopta: breves destellos, haces concentrados, amplios haces continuos, luz tenue o intensa, luz polarizada, luz de alta o de baja frecuencia, luz con muchas frecuencias a la vez. En la gama visible, el color lo determina la frecuencia (y la longitud de onda, tanto menor cuanto mayor sea la frecuencia). La fuente de luz artificial más familiar, la lámpara de incandescencia, emite a través de todo el espectro visible y genera así luz blanca.

CORTESIA DE JONATHAN KNIGHT *Universidad de Bath*

1. LUZ SUPERCONTINUA producida en una fibra óptica. La luz supercontinua posee muchas propiedades de la emisión láser, pero abarca una banda de frecuencias muy ancha, como revela el espectro completo de la luz, proyectado en la pantalla posterior.



La luz es uno de los fenómenos más importantes y versátiles de la naturaleza. A semejanza del correo, transfiere información de un punto a otro. Transmuta la materia como lo haría un alquimista. Inicia y modera procesos esenciales en química, biología y física del estado sólido. Y sin ella no veríamos.

La versatilidad de la luz proviene de la multitud de formas que adopta: breves destellos, haces concentrados, amplios haces continuos, luz tenue o intensa, luz polarizada, luz de alta o de baja frecuencia, luz con muchas frecuencias a la vez. En la gama visible, el color lo determina la frecuencia (y la longitud de onda, tanto menor cuanto mayor sea la frecuencia). La fuente de luz artificial más familiar, la lámpara de incandescencia, emite a través de todo el espectro visible y genera así luz blanca.

Si se pretende algo más que inundar una estancia de luz cálida, la luz de la bombilla tiene sus inconvenientes: su intensidad no es muy alta, no está colimada en una sola dirección y no es coherente (es decir, las fases de la oscilación de las partículas individuales, los fotones, que constituyen la emisión luminosa no coinciden). Los láseres solucionan estos tres problemas, pero la luz que emiten no es blanca; a lo sumo, se confina en una estrecha banda de frecuencias. Para muchas aplicaciones es más que suficiente la luz coherente emitida en una sola frecuencia o en una banda estrecha de frecuencias. Pero se abre un campo de posibilidades enteramente nuevo si la fuente de luz combina las propiedades del láser con la gran anchura de banda de una lámpara incandescente.

En 1969, mientras cursaba el doctorado en la Universidad de Nueva York, trabajé, dentro de los Laboratorios de General Telephone and Electronics (hoy Verizon), con Stanley L. Shapiro. Inventamos un nuevo tipo de luz de láser que abarcaba gran parte del espectro visible. Di a esa luz el nombre de "supercontinua". Hoy se produce luz supercontinua con una anchura espectral al menos de una octava. (Igual que en música, una octava se define como el intervalo entre una frecuencia y su duplo.) Dado que el espectro visible viene a ser una octava, la luz supercontinua realiza el sueño de una luz de láser blanca.

Esa anchura espectral permite aplicaciones muy ingeniosas. John L. Hall, de la Universidad de Colorado en Boulder y del Instituto Nacional de Pesas y Medidas de Estados Unidos, y Theodor Hänsch, del Instituto Max Planck de Optica Cuántica en Garching, compartieron el Premio Nobel de Física de 2005 por utilizar este tipo de luz para la medida de tiempos y frecuencias con suma exactitud.

Shapiro y yo produjimos un haz supercontinuo enviando impulsos de luz verde de láser de intensidad muy alta y brevísima duración (picosegundos, 10^{-12} segundos) a través de cristales o vidrios especiales. Mientras intentaba determinar por primera vez la vida útil de las excitaciones vibratorias de alta frecuencia (fonones) en cristales como la calcita, observé que se generaba luz blanca. Los impulsos luminosos interactuaban con el medio de tal modo que su anchura de banda crecía muchísimo. Más tarde, para extender más hacia el infrarrojo el espectro de la luz supercontinua, recurrimos también a líquidos como medio de interacción; otros usaron líquidos y gases.

La primera aplicación de la emisión supercontinua fue el estudio de la dinámica de las excitaciones vibratorias en los líquidos. Poco después, la fuente supercontinua sirvió de nuevo instrumento para explorar procesos fundamentales con duraciones del orden de picosegundos y femtosegundos (10^{-15} segundos). Se incluían ahí los eventos químicos primarios que tienen lugar cuando los fotones de luz se absorben en la fotosíntesis y en la visión, así como las etapas componentes de las reacciones químicas y los modos en que las moléculas excitadas por la luz se relajan sin emitir luz ellas mismas.

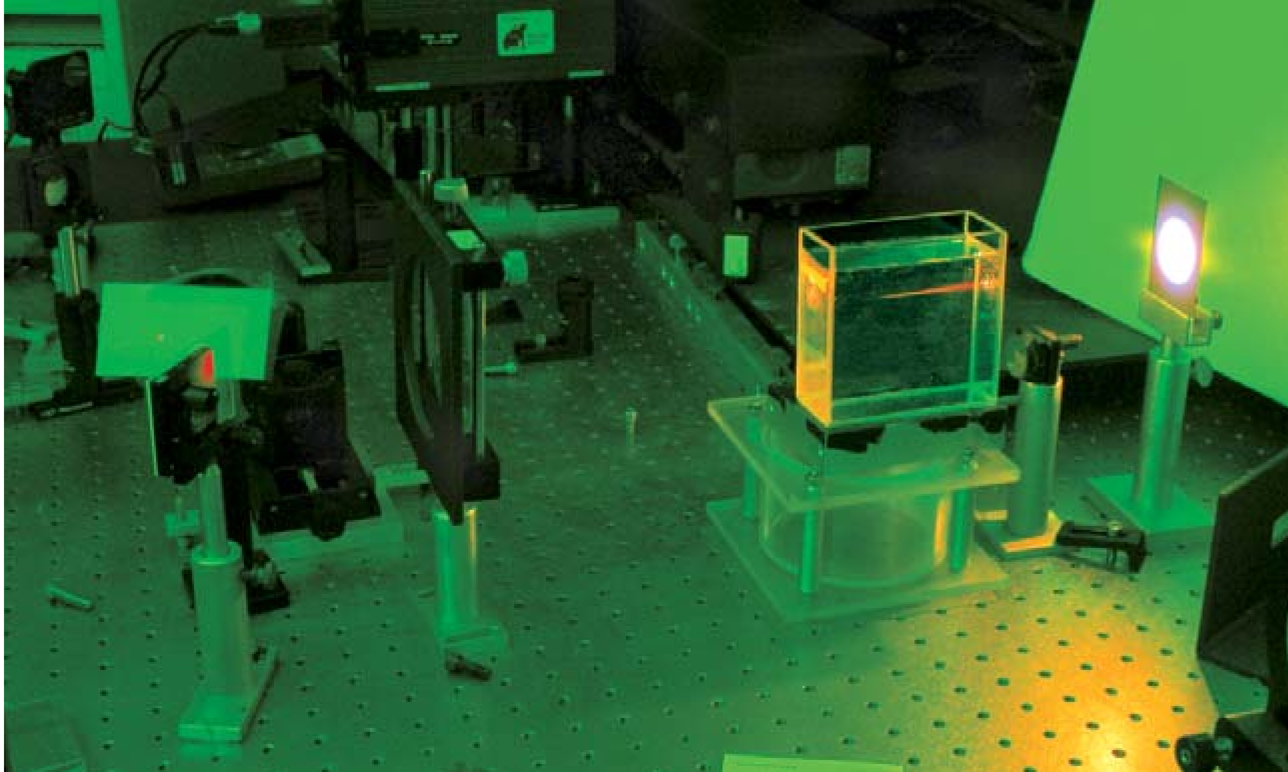
En 1999 se reavivaron las investigaciones: Jinendra K. Ranka, Robert S. Windeler y Andrew J. Stentz, de Lucent Technologies, generaron luz supercontinua en una clase especial de fibra óptica. Entre otras ventajas, la fibra confina la luz en una pequeña sección transversal, con lo que se mantienen elevadas las intensidades, aunque la luz recorra largas distancias. (Los procesos ópticos no lineales en los que se basa el supercontinuo se acentúan para intensidades altas.) Asimismo, es posible configurar la variación de las propiedades ópticas de la fibra para diferentes frecuencias de la luz con miras a optimizar la generación supercontinua y aprovechar nuevos fenómenos físicos en el momento de manipular la luz. De ahí las abundantes aplicaciones de este tipo de luz: mediciones del tiempo y la frecuencia de extrema precisión, comunicaciones ópticas de gran anchura de banda, para la toma de imágenes por medio de la tomografía óptica de coherencia, para estudiar la atmósfera, en la compresión de impulsos ultracortos a intervalos de tiempo aún más breves y, quizás, en las mediciones espaciales de la gravedad para la prospección de petróleo y minerales.

Producción de un supercontinuo

A la generación de impulsos de luz supercontinua por medio de un en-

Resumen/*Supercontinuo*

- La utilidad de la luz de láser estriba en su elevada intensidad y en su coherencia. Sin embargo, a diferencia de la luz blanca, la generada por láser suele constar sólo de una estrecha banda de frecuencias. La luz "supercontinua" combina las ventajas de la emisión láser con la anchura de banda de la luz blanca.
- El método preferido hoy para la generación de luz supercontinua consiste en enviar impulsos de láser de alta intensidad por fibras ópticas de diseño especial. A medida que recorre la fibra, la luz interacciona con el material de la fibra en una serie de procesos ópticos no lineales que ensanchan su banda.
- Entre las aplicaciones de la luz supercontinua figuran la medición de tiempo y frecuencias con fina precisión, las telecomunicaciones de alto rendimiento, la detección de compuestos químicos en la atmósfera y la toma de imágenes clínicas.



2. ESTE MONTAJE EXPERIMENTAL para la producción de luz supercontinua envía luz de láser de alta intensidad (*roja*) a través de un medio óptico adecuado, en este caso un recipiente de líquido, que amplía la anchura de banda de la luz (*luz blanca*).

CORTESIA DE ROBERT R. ALFANO

sanchamiento de la banda luminosa contribuyen fenómenos físicos muy diversos. El más importante, la automodulación en fase. En ese proceso, la luz va modificando el material que atraviesa de manera tal, que el material alterado, a su vez, actúa sobre la luz para incrementar su anchura de banda. Para comprenderlo, téngase en cuenta la forma de un impulso láser: la gráfica del campo eléctrico del impulso muestra una serie de oscilaciones, al principio pequeñas, que terminan por adquirir una amplitud máxima, para volver a disminuir hasta la nada (*véase el recuadro* "Generación de luz supercontinua").

El perfil general, o la envolvente, de las oscilaciones define el aumento sostenido de la intensidad luminosa y su posterior caída durante el transcurso del impulso. El índice de refracción del medio afecta a la propagación de las oscilaciones a través del medio en cuestión. La luz se propaga a una velocidad igual a la de la luz en el vacío, *c*, dividida por el índice de refracción.

Ahora bien, si el impulso tiene suficiente intensidad, el campo eléctrico de la onda distorsiona las nubes de electrones de los átomos que constituyen el medio y aumenta ligeramente el índice de refracción del material en ese punto. Este fenómeno, el efecto óptico Kerr, altera la fase de las oscilaciones del impulso; vale decir, modifica las posiciones de las crestas y los valles de la oscilación. En concreto, el aumento del índice retarda crestas y valles.

La magnitud del aumento del índice de refracción depende de la intensidad de la luz. En consecuencia, al pasar el impulso por determinado punto del medio, el índice de refracción varía allí continuamente, como también lo hacen los cambios de fase inducidos. En la mitad anterior del impulso, la intensidad y, por tanto, el índice de refracción aumentan con el tiempo, las posiciones relativas de crestas y valles se separan cada vez más y la frecuencia de la onda se reduce. En la mitad posterior, el índice cae con el tiempo y aumenta la frecuencia.

Cuando el impulso emerge del medio, sus oscilaciones son más amplias en el frente del impulso y más cortas en su retaguardia. Gráficamente, se parece a un muelle tensado entre dos puntos, con su mitad algo desplazada hacia un extremo.

Se aprecia con más claridad el ensanchamiento de la banda cuando se considera el espectro del impulso, es decir, la intensidad de cada frecuencia (o longitud de onda) que comprende. Aun antes de aparecer el efecto Kerr, un impulso como el que se describe no consiste en una sola frecuencia pura, sino en la suma de muchas ondas de distintas frecuencias.

Cualquier láser se caracteriza por emitir luz en longitudes de onda concretas y determinadas. Por consiguiente, la gráfica espectral de un impulso láser se asemeja a una serie de picos separados por iguales intervalos (como las púas de un "peine de frecuencias"); la envolvente de esa configuración constituye también la forma de un impulso, cuya anchura define la amplitud de la banda de frecuencias presente. La envolvente de las frecuencias será más amplia cuando adquiera intensidad apreciable el impulso que se propague a través de un medio donde el efecto Kerr sea significativo.

En el descubrimiento de 1969 se utilizaron impulsos de un picosegundo con energía de un milijoule. Parecerá poca energía (es la necesaria para levantar una grapa hasta una altura de varios centímetros); sin embargo, concentrada en un picosegundo y en un apretado haz, representa un gigawatt de potencia y una intensidad enorme, capaz de muchas cosas en ese ínfimo intervalo. Se requería una intensidad tan elevada porque los impulsos sólo podían propagarse a

través de unos escasos centímetros de vidrio donde actuaba el efecto Kerr. La alta intensidad inducía un efecto lo bastante vigoroso como para ensanchar bastante la banda de impulsos, incluso en su breve tránsito por el vidrio.

Cuando los impulsos recorren algunos centímetros más por el vidrio, se van separando en razón de otra propiedad asociada al índice de refracción: la dispersión del medio. En un medio normal, la dispersión obedece al índice de refracción; éste es un poco mayor para la luz de frecuencia más alta, que, por tanto, se propaga más despacio que la de frecuencia más baja. En consecuencia, las componentes de frecuencias diferentes avanzan a velocidades distintas, y el impulso, cuya existencia depende de que todas las frecuencias se alineen rígidamente ("estén en fase") en su centro, se desdibuja muy pronto.

Las fibras ópticas utilizadas por Ranka y su grupo en 1999 solucionaron el problema por sus atípicas características de dispersión: dispersión cero y dispersión anómala (el índice de refracción disminuye al aumentar la frecuencia de la luz). En una fibra así, los impulsos de luz supercontinua pueden propagarse mil veces más lejos sin sufrir dispersión. Y puesto que los impulsos viajan por la fibra durante un tiempo mayor, fenómenos como el Kerr tienen más tiempo para actuar y no se requiere que sean tan intensos para que ejerzan efectos significativos. A su vez, esto posibilita una generación supercontinua por láseres de baja potencia que emitan impulsos de microjoule, e incluso de nanojoule, en lugar de los impulsos de milijoule que antes se utilizaban.

Otro fenómeno muy importante desempeña una función destacada cuando la fibra presenta dispersión anómala en la banda de frecuencias del impulso entrante. En tal situación, cada impulso se transforma en un solitón, un tipo especial de onda. Se caracteriza esta onda solitaria por el mantenimiento de su forma en todo el recorrido (lo corriente es que el impulso tienda a dispersarse gradualmente). La forma persiste porque la dispersión anómala actúa sobre el solitón de un modo que contrarresta los efectos de otras propiedades del medio. Con dispersión anómala, son los solitones, y no la automodulación de fase antes descrita, los que generan un supercontinuo.



3. LA DIFRACCION cuando la onda emerge de una abertura pequeña puede influir en la generación de luz supercontinua. En la mitad superior, la difracción de un haz de láser en el infrarrojo cercano a través de un orificio de 300 micrometros y sobre una lámina de vidrio cercana produce un haz suficientemente intenso para la generación de luz supercontinua (*blanca*). En la mitad inferior, la luz difractada por un borde recto genera luz supercontinua partiendo de dos haces, que se interfieren mutuamente y crean franjas.

CORTESIA DE ROBERT R. ALFANO

En uno u otro caso (dispersión normal o anómala), la banda del impulso supercontinuo se ensancha todavía más en virtud de otros efectos ópticos no lineales, entre ellos el mezclado de cuatro frecuencias y los procesos Raman. El mezclado de cuatro frecuencias consiste en que tres frecuencias de luz interaccionen en un medio óptico no lineal para generar luz en una cuarta frecuencia. En los procesos Raman, la luz interacciona con las excitaciones vibratorias de las moléculas que constituyen el medio; los fotones de luz pierden o ganan energía, lo cual modifica su frecuencia.

Esa gavilla de interacciones contribuyen a la vez, en mayor o menor grado, a la evolución de los impulsos. Los procesos que predominen dependerán de todos los factores que puedan variarse en la investigación: las frecuencias de la luz, la intensidad y el tiempo de duración de los impulsos entrantes y las propiedades ópticas de la fibra. No hay otra manera fiable de predecir el resultado final que realizar simulaciones numéricas por ordenador de los impulsos luminosos que recorren la fibra. O ensayar el experimento y ver qué sucede.

Para la generación supercontinua se utilizan fibras de una clase especial: las fibras microestructuradas. La sección transversal de una de estas fibras muestra un patrón de agujeros que persiste a lo largo de la fibra. En uno de los diseños más utilizados, estos agujeros rodean un núcleo macizo de sílice, a semejanza de un panal de abejas que sólo tuviera ocupada la celda central. El índice de refracción del núcleo es elevado; el del revestimiento que lo envuelve, con sus capilares de aire y la sílice entre ellos, es menor. Esa disposición concéntrica de los índices de refracción sirve para guiar los impulsos de luz a lo largo de la fibra. Gracias a estas fibras de dispersión nula y dispersión anómala, se ha logrado generar una luz supercontinua que abarca más de dos octavas, del infrarrojo al ultravioleta.

Metrología

Como se indicaba anteriormente, la generación de luz supercontinua en las fibras ópticas ha abierto una extensa gama de aplicaciones. La más importante y consolidada es el desarrollo de mediciones de la frecuencia y relojes de suma precisión. Dentro de este campo, su utilidad se descubre en las técnicas del "peine de frecuencias ópticas", que ofrecen una precisión superior mediante sistemas mucho más pequeños y sencillos que los métodos al uso. En particular, el proceso de autorreferencia, que en 2000 presentaron por separado los grupos dirigidos por Hall y Hänsch, se torna posible cuando el peine de

frecuencias abarca una octava completa. Consiste en hacer que una luz del extremo de bajas frecuencias del espectro duplique su frecuencia e interfiera luz cuya frecuencia caiga en el extremo superior.

Partiendo de los trabajos de Hall y Hänsch, se está intentando desarrollar sistemas capacitados para medir frecuencias con precisiones relativas de 10^{-16} a 10^{-18}. (Hasta el momento sólo se ha podido llegar a 10^{-14}.) Una precisión tan extraordinaria tendría efectos prácticos en la mejora de los sistemas de posicionado global (GPS), la navegación espacial y la alineación de las grandes redes de radiotelescopios. También en experimentos que quieran poner a prueba los principios esenciales de la relatividad especial y otros afines, como la isotropía del espacio, la simetría de materia y antimateria y la invariabilidad de las constantes físicas [*véase* “Búsqueda de violaciones de la relatividad”, por Alan Kostelecký; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre de 2004; “Creación de antimateria fría”, por Graham. P. Collins; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 2005; y “Variación de las constantes”, por John D. Barrow y John K. Webb; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 2005].

Las mediciones de frecuencias y los relojes son dos facetas de la misma técnica. Actualmente se persigue el desarrollo de relojes con una precisión de un femtosegundo (10^{-15} segundos). En última instancia, el peine de frecuencias ópticas permitiría alcanzar una exactitud relativa de 10^{-18}, ideal para la temporización de ordenadores ópticos y quizá para detectar yacimientos de petróleo y de minerales gracias a sus ligerísimos efectos en el campo gravitatorio circundante.

Telecomunicaciones

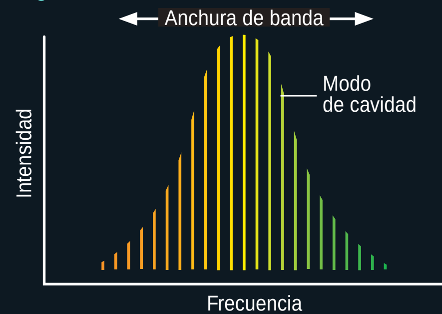
La telecomunicación tiene consecuencias comerciales más inmediatas que la medición ultraprecisa de la frecuencia. Varias propiedades del haz supercontinuo lo convierten en un medio óptimo para la transmisión de datos a velocidades mil veces mayores que las de los sistemas existentes. La fibra óptica que transmite luz infrarroja es ya el soporte más generalizado para el envío de datos a altas velocidades y a largas dis-

GENERACION DE LUZ SUPERCONTINUA

Los láseres de impulsos emiten ráfagas de luz en una gama limitada de frecuencias. Cuando un impulso de intensidad suficientemente elevada atraviesa un medio, la fibra óptica por ejemplo, se dan ciertos procesos no lineales, entre ellos la “automodulación de fase”, que generan frecuencias de luz adicionales y entregan a la salida un haz supercontinuo de amplio espectro.

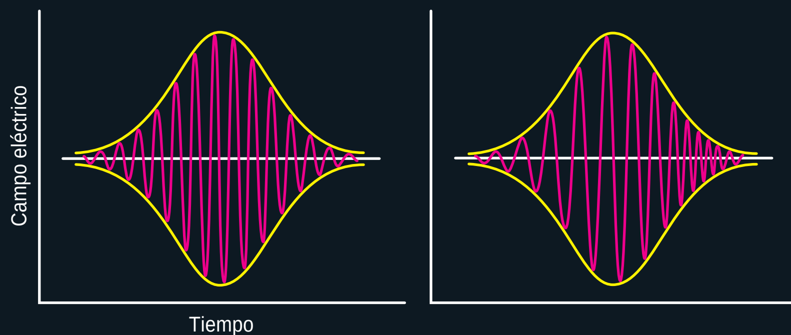
PEINE DE FRECUENCIAS

Los láseres de impulsos emiten series repetitivas de impulsos. Cada impulso consta de numerosos haces y cubre una pequeña gama de frecuencias. El espectro de la serie de impulsos forma un peine de frecuencias, es decir, un conjunto de frecuencias discretas separadas por intervalos iguales (modos de cavidad).



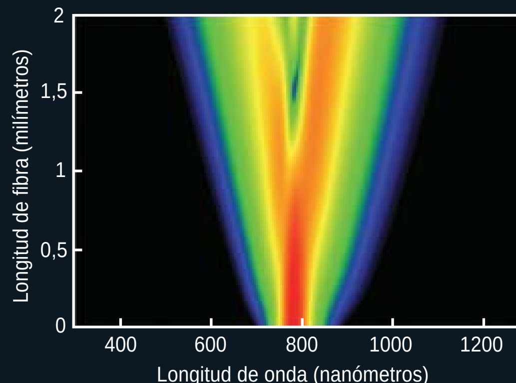
AUTOMODULACION DE FASE

Las oscilaciones electromagnéticas de un impulso de láser (*izquierda, en violeta*) tienen una longitud de onda constante, pero su intensidad crece y decrece (envolvente del impulso, *en amarillo*). Un impulso de alta intensidad puede elevar momentáneamente el índice de refracción del medio en una cantidad proporcional al valor de la intensidad en cada instante de tiempo. La variación, en el tiempo, del índice de refracción del medio hará cambiar a su vez la fase de la onda (las posiciones de crestas y valles, *a la derecha*) y provocará la aparición de nuevas frecuencias y longitudes de onda.



ESPECTRO ENSANCHADO

El desplazamiento de un impulso simulado de 20 femtosegundos (2×10^{-14} segundos) a lo largo de una fibra óptica revela de qué modo ensanchan el espectro del impulso los efectos no lineales, entre ellos la automodulación de fase. Los colores representan a escala logarítmica la intensidad de la luz en cada longitud de onda (el rojo indica alta intensidad). En este ejemplo, el espectro de luz, tras recorrer dos milímetros por la fibra, abarca un poco más de una octava (que, como en música, es el intervalo entre una frecuencia y su duplo).



MELISSA THOMAS (*arriba y centro*); RÜDIGER PASCHOTTA *RP Photonics Consulting* (*abajo*)

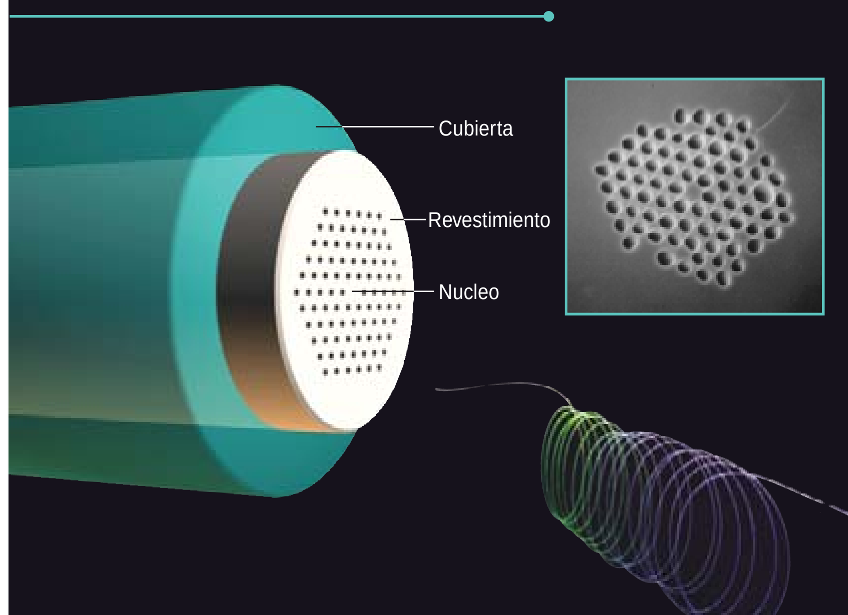
tancias. La ciencia y la ingeniería trabajan sin tregua para transportar cada vez más datos en una fibra, en pos de atender la demanda mundial, siempre en aumento, de sistemas y redes de comunicaciones de mayor capacidad. Se pretende alcanzar velocidades de transmisión de terabits (10^{12}) y petabits (10^{15}) por segundo. Los sistemas interurbanos de fibra óptica transmiten hoy datos a unos 10 gigabit (0,01 terabit) por segundo.

Por su extraordinaria anchura de banda, el haz supercontinuo es un medio eficaz y económico de obtener multitud de canales en distintas longitudes de onda, sin tener que recurrir al empleo de cientos de láseres. El ancho de la banda se puede explotar mediante la multiplexación superdensa por división en longitudes de onda, que codifica los trenes de datos en numerosas frecuencias de luz que se transmiten simultáneamente. A diferencia de la luz que transmiten 100 láseres individuales, la luz supercontinua puede ser coherente en una extensa gama de frecuencias: todos los canales oscilan en sincronía, en vez de seguir cada uno su propio ritmo; todo lo cual redunda en el grado de control de la luz que pueda tenerse.

En opción alternativa, cabe recurrir a la multiplexación por división en el tiempo, consistente en enviar una serie de impulsos ultracortos de luz supercontinua (inferiores a 100 femtosegundos, 10^{-13} segundos), con secuencias que representen diferentes canales de datos entrelazados. Con impulsos tan cortos importa controlar la relación exacta entre las oscilaciones individuales del campo eléctrico (la onda portadora) y la envolvente del impulso. Este parámetro, denominado la fase relativa de la portadora y la envolvente, determina si el máximo de la envolvente del impulso ocurre en un momento en que el campo eléctrico de la onda se halla en una cresta, en un valle o en algún punto intermedio. Las propiedades del haz supercontinuo facilitan ese control.

FIBRAS MICROESTRUCTURADAS

Las fibras ópticas recorridas en toda su longitud por capilares de aire han revolucionado la generación y los usos de luz supercontinua. En el diseño representado aquí (*abajo y a la derecha*), esta disposición disminuye el índice de refracción del revestimiento que rodea el pequeño núcleo macizo de sílice, con lo que la luz queda confinada en el núcleo. El color cambiante de la luz a lo largo de la fibra (*a la derecha, abajo*) revela el ensanchamiento de la banda inducido por la fibra y reforzado por otras propiedades de su índice de refracción.



MELISSA THOMAS (*ilustración*); REIMPRESION AUTORIZADA POR LUCENT TECHNOLOGIES, INC./BELL LABS, CORTESIA DE ANDREW STENTZ, JINENDRA RANKA Y R. S. WINDELER (*micrografía y muelle en espiral*)

Varios grupos japoneses han conseguido ya transmitir datos a velocidades de terabits por segundo en un pequeño segmento del espectro supercontinuo. Todavía hay que superar grandes obstáculos para lograr velocidades de petabits por segundo. Entre ellos, reducir a alrededor de un picosegundo la duración de un bit y aumentar el número de longitudes de onda coherentes en un haz supercontinuo.

Ciencia de la atmósfera

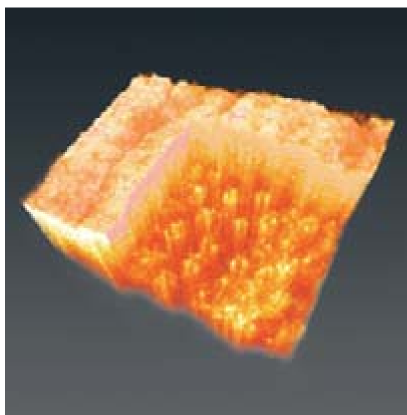
Las aplicaciones en telecomunicaciones se apoyan en la producción de un supercontinuo en el entorno totalmente controlado de una fibra óptica. Sin embargo, para ciertos fines se utiliza un haz supercontinuo generado a cielo abierto. Así, para la detección remota de especies moleculares presentes en la atmósfera. La propagación por el aire de impulsos láser ultrarrápidos e intensos crea, a su paso, "filamentos" largos y estrechos en los que el aire está ionizado; en su interior, se desaloja de las moléculas de aire a los electrones, con lo que se crea un plasma de iones positivos y electrones de carga negativa.

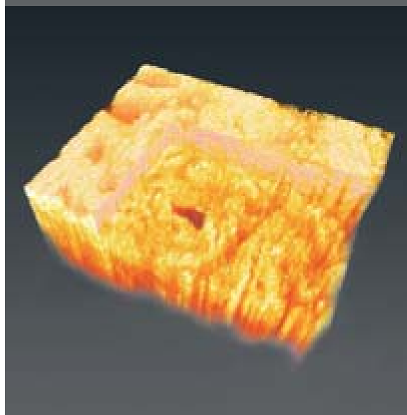
Los filamentos pueden guiar los impulsos de luz y evitar que se dispersen. Se atribuye este efecto a un equilibrio entre el desenfoque causado por la difracción (tendencia de la onda a dispersarse a la salida de una abertura pequeña) y el autoenfoque que produce el plasma ionizado.

En el interior de los filamentos resulta posible convertir una parte notable de la energía de los impulsos en luz supercontinua blanca en distancias mayores de 20 metros. Los contaminantes y aerosoles del aire absorberán luz en las frecuencias características que les correspondan; el amplio espectro de la luz supercontinua permitirá detectar su espectro de absorción simultáneamente en las bandas ultravioleta, visible e infrarroja.

Creación de imágenes

La luz supercontinua vale para producir imágenes de alta resolución de los tejidos de nuestro cuerpo. La tomografía óptica de coherencia, elaborada por James G. Fujimoto y su grupo, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, puede realizarse *in situ* sobre organismos vivos o mues-





4. LA TOMOGRAFIA OPTICA DE COHERENCIA se vale de la luz para generar imágenes similares a las de ultrasonidos, pero con resolución mucho más fina. En estas imágenes tridimensionales, tomadas con esa técnica, de un tejido normal (*arriba*) y de un tumor benigno (*abajo*), ambas de muestras quirúrgicas obtenidas del colon, se comprueba la estructura glandular desorganizada que caracteriza al tumor. El uso de luz supercontinua permitió una resolución cerca de cuatro veces más fina que la resolución de las imágenes de la tomografía óptica de coherencia normal.

tras tomadas de ellos. Se ha aplicado dicha técnica al estudio de la retina, enfermedades de la piel, trastornos gastrointestinales y carcinomas, tanto en humanos como en animales.

Para obtener una imagen por tomografía óptica de coherencia, el haz luminoso se divide en dos partes: una ilumina un punto de la muestra y la otra (la luz de "referencia") se inyecta en un segmento de fibra óptica. Cuando la luz de referencia se recombina con la luz reflejada o dispersada por la muestra, se produce una fuerte interferencia entre ambas, en el supuesto de que hayan invertido el mismo tiempo en sus respectivas trayectorias. Una propiedad de la luz de la fuente, la longitud de coherencia, determina con qué precisión han de coincidir las temporizaciones. Las imágenes de alta resolución que toma este método dependen de una corta longitud de coherencia, por cuyo motivo se exige una coincidencia cabal.

De ese modo, cuando el pincel de luz penetra en la muestra, sólo la luz reflejada desde una determinada profundidad interferirá con la luz de referencia. Por consiguiente, si se desplaza lateralmente la luz a través de la muestra mientras se mantiene fija la duración del trayecto de la luz de referencia, se obtendrá una imagen bidimensional de la muestra a cierta profundidad. El espesor de la capa que contribuye a la imagen se denomina resolución axial de la imagen.

Los primeros sistemas de producción de imágenes de este tipo usaban la luz generada por cierto tipo de diodo y ofrecían una resolución axial de 10 a 15 micrometros. (Compárese con los 100 micrometros que suelen dar las imágenes por ultrasonidos de alta frecuencia.) Con láseres de impulsos de femtosegundos optimizados para longitudes de coherencia cortas se ha llevado la resolución axial hasta menos de dos micrometros: se la ha mejorado casi diez veces.

La resolución axial depende también de la anchura de banda de la fuente de luz: cuanto más ancha sea la banda, más fina será la resolución. La luz supercontinua posee una longitud de coherencia corta y una banda más ancha que cualquier láser de femtosegundos; resulta, pues, óptima para la tomografía óptica coherente de alta resolución. En 2002, el equipo encabezado por Boris Považay aplicó luz supercontinua generada en fibras microestructuradas para producir imágenes de células de un carcinoma humano con resolución axial de 0,5 micrometros (el diámetro de una célula típica ronda los 10 micrometros).

El supercontinuo es uno de los efectos más espectaculares y elegantes de la física óptica: una luz monocolor generada por intensos impulsos de láser se vuelve blanca al pasar por una fibra óptica, un cristal o un gas. La generación supercontinua aporta una gama de aplicaciones, desde la detección de agentes químicos a la medición más precisa de tiempos y frecuencias que hoy es posible. A los 35 años de su descubrimiento, este fenómeno, impresionante a los ojos, continúa alumbrando nuevos sectores de la actividad científica.

El autor

Robert R. Alfano, es "profesor distinguido" de ciencia e ingeniería en la Universidad Municipal de Nueva York, donde dirige el Instituto de Espectroscopía Ultrarrápida y Láseres, así como el Centro del Estado de Nueva York para Tecnología Avanzada en Aplicaciones Fotónicas. Investiga en imágenes biomédicas y espectroscopía, biofísica, láseres ultrarrápidos, óptica no lineal y fotónica. Ha publicado más de 700 trabajos en revistas especializadas y posee 94 patentes. Desearía agradecer a Swapan Gayen, Alvin Halpern, Lauren Gohara, Kestutis Sutkus y Frances Rodriguez su colaboración en diversos aspectos de este artículo.

Bibliografía complementaria

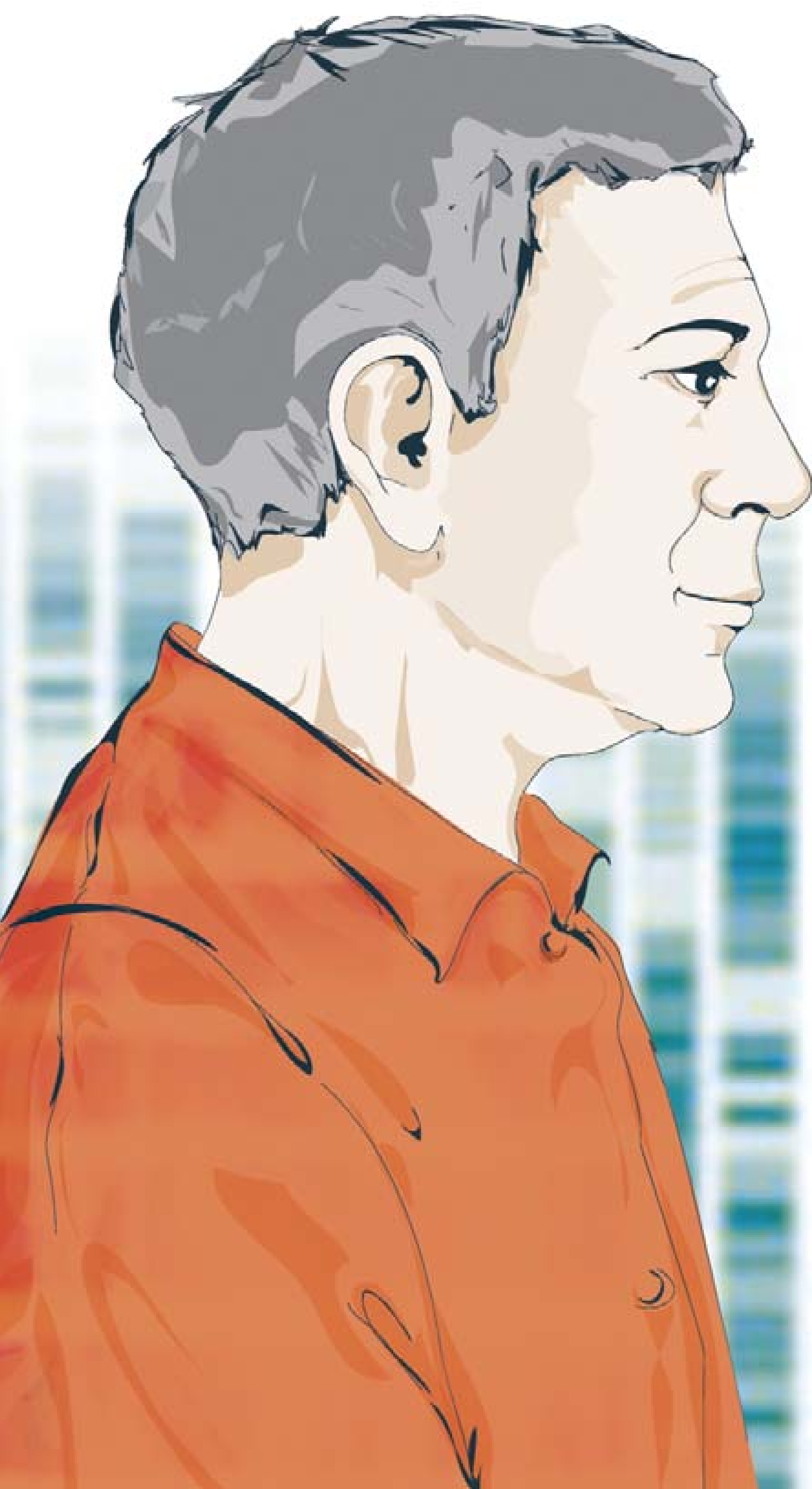
OBSERVATION OF SELF-PHASE MODULATION AND SMALL-SCALE FILAMENTS IN CRYSTALS AND GLASSES. R. R. Alfano y S. L. Shapiro en *Physical Review Letters*, vol. 24, n.º 11, págs. 592-594; 16 de marzo, 1970.

SUPERCONTINUUM GENERATION IN PHOTONIC CRYSTAL FIBER. John M. Dudley, Goëry Genty y Stéphane Coen en *Reviews of Modern Physics*, vol. 78, págs. 1135-1184; 4 de octubre, 2006.

THE SUPERCONTINUUM LASER SOURCE: FUNDAMENTALS WITH UPDATED REFERENCES. Preparado por Robert R. Alfano. Springer, 2006.

ENCYCLOPEDIA OF LASER PHYSICS AND TECHNOLOGY. Rüdiger Paschotta. Disponible en www.rp-photonics.com/encyclopedia.html.

Oncología



El estudio del cáncer
en cánidos aporta
una ayuda singular
en la lucha contra
la versión humana
de la enfermedad,
al tiempo que supone
una mejora en el cuidado
de los perros domésticos

David J. Waters
y Kathleen Wildasin

canina

Imaginemos un hombre de 60 años recuperándose en casa tras la extirpación quirúrgica de un cáncer de próstata. La compañía de su viejo perro labrador le produce un profundo sentimiento de bienestar. Quizás este hombre sepa que, hace pocos años, el director del Instituto Nacional del Cáncer de los EE.UU. lanzó un reto a los oncólogos: encontrar maneras de eliminar el sufrimiento y la muerte ocasionados por el cáncer sobre el año 2015. Pero de lo que este hombre probablemente no es consciente es de que el animal de compañía que se encuentra a su lado podría desempeñar una función de suma importancia en esa empresa.

Para alcanzar el ambicioso objetivo del Cáncer 2015 se requerirá la aplicación de todos los medios disponibles por los investigadores, amén de la apertura a ideas nuevas. Pese a la avalancha de conocimientos sobre la biología de las células cancerígenas, su desarrollo terapéutico avanza con exasperante lentitud. Se han descubierto numerosos fármacos que curan cánceres inducidos artificialmente en ratones, pero que fracasan en ensayos con humanos. Los modelos basados en roedores no dan la talla. Si hemos de combatir el cáncer, urge otra estrategia.

ALISON KENDALL (*ilustración*); PASIEKA *Photo Researchers, Inc.* (*autoradiograma*)



1. CANES Y HUMANOS sufren a menudo los mismos tipos de cáncer. Las semejanzas, génicas incluidas, aportan información de sumo interés. [En el fondo, la secuencia de ADN de una muestra de tejido.]

Repasemos algunos datos. Aproximadamente el 40 por ciento de las familias estadounidenses tienen perro. A unos cuatro millones de estos animales se les diagnosticará un cáncer en el año en curso. Perros y humanos son las dos únicas especies que desarrollan, de forma natural, cáncer de próstata letal. El cáncer de mama canino se propaga sobre todo a los huesos, igual que ocurre entre las mujeres. El cáncer de huesos más frecuente en perros, el osteosarcoma, corresponde al mismo cáncer que afecta a los adolescentes humanos.

En la opinión de los investigadores que se dedican al campo emergente de la oncología comparada, tales semejanzas ofrecen una aproximación nueva para combatir el cáncer. Mediante la exploración de las semejanzas y las diferencias, se comparan cánceres que se presentan de forma natural en animales y personas.

Para superar los obstáculos que se interponen en el camino que lleva a la meta del Cáncer 2015, los oncólogos se valen ahora de los perros. Se proponen mejorar los tratamientos mediante la optimización de las dosis farmacológicas, la identificación de factores ambientales cancerígenos, el desentrañamiento de la resistencia que algunos oponen a los tumores y el avance en la prevención del cáncer. Al tiempo que el reloj del Cáncer 2015 continúa su tictac, la oncología canina comienza a transformarse en una herramienta científica que ayudará a mejorar la salud de otros animales domésticos y de los humanos.

¿Por qué los perros?

Durante decenios, se ha analizado la toxicidad de nuevos agentes contra el cáncer en sabuesos de laboratorio, antes de estudiar los compuestos en humanos. Los oncólogos tienen razones para pensar que los perros que desarrollan cáncer de forma natural pueden convertirse en modelos idóneos para el desarrollo de tratamientos antitumorales.

Una primera razón concierne al modo en que se llevan a cabo los ensayos clínicos en humanos. Ante la necesidad de asegurar que los beneficios potenciales de una terapia experimental superan a los riesgos, la evaluación de fármacos suele realizarse con todas las probabilidades en contra del éxito; se busca derrotar cánceres voluminosos y avanzados en los que han fracasado tratamientos previos con otros agentes.

En oncología comparada, en cambio, se ensayan nuevos tratamientos contra cánceres en una etapa precoz; se suministran los fármacos tal y como se usarían en las personas. Un fármaco experimental que demuestre eficacia en animales domésticos ofrece pistas sobre qué terapias gozan de mayor probabilidad de éxito en humanos. De ahí el optimismo de los expertos en oncología comparada, convencidos de que sus descubrimientos en perros mostrarán mayor poder predictivo que el alcanzado en la investigación con múridos; facilitarán la identificación de los agentes que merecen analizarse —y los que no— a gran escala en ensayos con humanos.

Los perros constituyen excelentes modelos para ahondar en la biología del cáncer en humanos. Ello se debe, en parte, a su tendencia a sufrir las mismas enfermedades que afectan a las personas. Abundan los ejemplos. El linfoma más frecuente en perros guarda semejanza con el linfoma no Hodgkin de grado medio y alto de células B en humanos. El osteosarcoma, la forma más común de cáncer de hueso en perros de razas grandes y gigantes, se parece mucho al osteosarcoma en adolescentes, por su ubicación en el esqueleto y agresividad; al microscopio, las células cancerosas procedentes de un adolescente con osteosarcoma son indistinguibles de las células de cáncer óseo de un perro labrador.

El cáncer de vejiga, el melanoma y el cáncer de boca constituyen otros ejemplos de patologías compartidas por los perros y sus amos. En otro parangón, las hembras esterilizadas antes de la pubertad muestran menor propensión al cáncer de mama que sus equivalentes sin mutilar; lo mismo ocurre en las mujeres a las que se han extirpado los ovarios, las que empiezan a menstruar tarde o las que entran pronto en la menopausia: todas presentan un riesgo limitado de padecer cáncer de mama.

Los cánceres caninos mimetizan los de humanos también en la metástasis (la propagación, a menudo letal, de las células cancerosas hasta puntos alejados de su foco original). Descubrir el mecanismo de propagación de células tumorales en órganos concretos constituye una prioridad máxima en la investigación oncológica. Cuando ciertos tipos de cáncer se extienden, muestran preferencia por algunos tejidos sobre otros. Las razones no están del todo claras. Dado que la metástasis es la responsable de la mayoría de las muertes por cáncer, urge ahondar en los mecanismos de control de este proceso. Estudios de perros con cáncer de próstata o de mama resultarían de suma utilidad, pues dichos tumores suelen propagarse en estos animales igual que lo hacen en humanos: por el esqueleto. De hecho, la investigación con perros trata de averiguar cuáles son las relaciones entre las células tumorales y el hueso que hacen del esqueleto un sitio tan favorito para la colonización.

El modelo canino para el estudio del cáncer en humanos cuenta con sólido respaldo teórico. Desde una perspectiva evolutiva, perros y humanos están construidos para alcanzar su reproducción con éxito. Estamos “diseñados” para ganar la carrera. Pero carecemos de un diseño ideal para resistir o reparar el daño génico que se acumula en nuestro orga-

Resumen/*Cáncer canino*

- A millones de perros se les diagnosticará cáncer este año. En numerosos casos, la enfermedad seguirá un curso parecido a la versión de la patología que sufren los humanos.
- El estudio de esos tumores arroja luz sobre la biología de sus análogos humanos. Las pruebas preliminares con estos animales indican qué terapias merece la pena seguir ensayando en perros y en humanos; asimismo, guían la optimización de las dosis y el método de administración de los fármacos.
- Tales estudios mejorarán la prevención del cáncer y su tratamiento en humanos y canes.

RAZAS EN PELIGRO

Las razas que representan estos perros se hallan expuestas a cánceres que afligen a los humanos. Observadas al microscopio, sus patologías presentan el mismo aspecto que las versiones humanas. Desarrollan también un curso semejante. Ante tales semejanzas, se columbra que las respuestas caninas a los fármacos experimentales constituirían un buen indicador de su mecanismo de operación entre los humanos. Además, el estudio de los genes que incrementan la proclividad de razas concretas a tipos particulares de cánceres se espera que ayude a identificar los genes de la sensibilidad en humanos.



Rottweiler: Cáncer óseo



Collie: Cáncer nasal



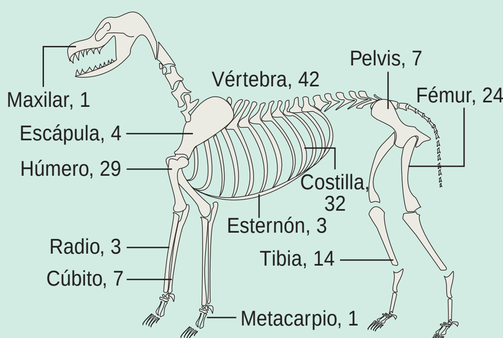
Chow Chow: Cáncer de estómago



Labrador: Linfoma



Boxer: Tumor cerebral



LA DISTRIBUCION ESQUELETICA de las metástasis constituye otro aspecto del cáncer que comparten canes y humanos. En los perros, las lesiones muestran el mismo patrón "por encima del codo, por encima de la rodilla" que se observa en las personas. Averiguar por qué se presenta este patrón en los perros ayudará a explicar la distribución en humanos y quizá sugerirá nuevos tratamientos paliativos. [Las cifras indican el número de metástasis encontradas en cada sitio en un estudio.]



Terrier escocés: Cáncer de vejiga

DK LTD. *Corbis* (*labrador*); CORBIS (*rottweiler*); CORBIS (*boxer*); YANN ARTHUS-BERTRAND *Corbis* (*chow chow, terrier, collie*); DANIELA NAOMI MOLNAR, FUENTE: DAVID WATERS (*esqueleto de perro*)

nismo. Un daño celular que podría resultar en cáncer.

Antaño, nuestros antepasados no vivían tiempo suficiente para verse afectados por cánceres asociados a la edad. Pero la sanidad y la medicina modernas han convertido en algo común la longevidad y el cáncer en la vejez. Lo mismo se aplica a nuestros animales domésticos. Los perros, a los que protegemos cuidadosamente de los depredadores y de la enfermedad, viven más que sus antepasados salvajes; por ello aumenta su propensión al cáncer en los últimos años de vida. En breve, el riesgo de sufrir cáncer a lo largo de la vida sigue patrones semejantes en perros y humanos.

Además de sufrir cánceres similares a los humanos, los perros aportan una valiosa información desde otros puntos de vista. Su tiempo de vida, más corto que el de las personas, nos permite determinar con mayor prontitud si una estrategia de prevención o una terapia tienen probabilidades de mejorar los índices de supervivencia en humanos.

Y aunque los veterinarios disponen de mayores recursos para el tratamiento del cáncer, siguen siendo ineficaces las terapias estándar de numerosos tumores caninos. Dado que la mayoría de los cánceres diagnosticados en perros terminan en muerte, los propietarios no suelen oponerse a que su animal de compañía participe en ensayos clínicos que podrían salvarle la vida y, con ello, proporcionar quizá la información necesaria para trasladar una terapia prometedora a ensayos clínicos en humanos.

Avances en el tratamiento del cáncer

Hay en marcha, en distinto grado de desarrollo, varias investigaciones sobre oncología canina. En un comienzo primaba la salvación de las extremidades de los adolescentes con cáncer óseo. Hace veinticinco años, el diagnóstico de osteosarcoma en un joven significaba la amputación del miembro afectado, quimioterapia (administración de fármacos en sangre, para atacar tumores en cualquier parte del cuerpo) ineficaz o inexistente, y una muerte casi segura. Hoy en día, la amputación se evita mediante el cincelado del tejido óseo enfermo y la sustitución del mismo por un injerto de hueso y un implante metálico.

El proceso descrito lo perfeccionaron en perros Stephen Withrow y sus colaboradores, de la Universidad estatal de Colorado. A ese grupo debemos los primeros avances técnicos que reducen el riesgo de complicaciones; así, la colocación de cemento óseo en el espacio de la médula del injerto óseo. Demostraron también que un tumor en principio no operable podía convertirse en operable mediante quimioterapia intraarterial preoperatoria. Al trabajo de este grupo se atribuye el aumento de la tasa de curación del osteosarcoma en adolescentes.

Los efectos locales de los tumores suelen controlarse mediante cirugía o radioterapia. Mucho más difícil resulta combatir la metástasis. Se requiere quimioterapia. Se trabaja en la síntesis de compuestos que modifiquen los procesos celulares que regulan la supervivencia y la proliferación de los focos tumorales metastásicos, así como su sensibilidad a las sustancias anticancerígenas. Un agente experimental es el ATN-161, que opera mediante la inhibición de la formación de nuevos vasos sanguíneos que potencian el crecimiento tumoral y la metástasis. De momento se está ensayando en canes con cáncer de huesos propagado a los pulmones. Otra línea abierta concierne a la capacidad

El modelo animal ideal: un concepto invalidado



LOS MURIDOS constituyen uno de los modelos animales favoritos de los oncólogos. Pese a ello, las terapias que funcionan con éxito en ratas y ratones a menudo fracasan en humanos.

PASCAL GOETCHELUCK *Photo Researchers, Inc.*

Algunos expertos sostienen que el desarrollo de las terapias contra el cáncer ha pecado de una lentitud exasperante. Lo atribuyen a la falta de modelos animales adecuados. Pero el problema quizá no resida en los animales, sino en su forma de aplicación y en la información que se pretende obtener de ellos.

Un modelo constituye, por definición, una "imitación". Por tanto, un modelo animal del cáncer no es lo mismo que una persona que padece cáncer. Los modelos múridos se obtienen mediante la inducción instantánea de un tumor: se les inyectan células tumorales o se les bombardea con dosis de agentes cancerígenos mayores cuya cuantía ningún ser humano recibirá nunca. Es dudoso que los cánceres así provocados remeden con exactitud un proceso complejo que a menudo requiere más de 20 o 30 años para desarrollarse en una persona. Los tumores animales que aparecen de modo natural, como los que afectan a los perros, ofrecen la oportunidad de estudiar tal complejidad de una forma menos artificial.

Pero ningún modelo animal puede dar respuesta a todas las cuestiones de importancia relacionadas con la prevención o el tratamiento de un tipo concreto de cáncer humano. Mejor resultaría para los investigadores prestar atención al planteamiento de preguntas específicas y dejar que éstas fuesen las que decidieran la selección del sistema modelo. Para algunas cuestiones, los cultivos celulares o los estudios en múridos serán lo apropiado. Para otras, deberá recurrirse a pruebas en humanos. En ese sentido, un ensayo clínico en humanos constituye, a su vez, una investigación con un modelo animal, puesto que se emplea un grupo de personas para representar a la población humana en su conjunto.

que ofrece el ATN-161 de potenciar los efectos de las quimioterapias al uso. Si estas pruebas tienen éxito, allanarán el camino para los ensayos clínicos en humanos.

Los oncólogos no han abandonado su interés en medicamentos comunes. Nos referimos a los antiinflamatorios no esteroideos (NSAID, de "nonsteroidal anti-inflammatory drug"), la categoría de compuestos a la que pertenece el ibuprofeno. Algunos NSAID presentan actividad antitumoral contra varios tumores caninos. El piroxicán ha demostrado una actividad antitumoral notable en estudios de perros con cáncer de vejiga; el fármaco se encuentra ahora en ensayos clínicos en humanos para determinar si previene el progreso de las lesiones precancerosas de vejiga, evitando que se conviertan en un cáncer letal.

El desarrollo de nuevas terapias contra el cáncer no se limita a la búsqueda de nuevos fármacos. Se propone también optimizar su administración. ¿Inyección intravenosa o inhalación por vía nasal? Ese es el tipo de información que necesitan los científicos que ensayan nuevos agentes contra el cáncer de pulmón. Si no llega al tumor la cantidad correcta del fármaco, ni siquiera las sustancias que muestran una vigorosa actividad antitumoral en una placa de Petri tendrán la más mínima probabilidad de éxito en humanos. Además, la administración de fármacos directamente contra su diana ("terapia regional") cuenta con un beneficio adicional: evita la toxicidad asociada con la terapia sistémica.

Se emplearon perros para el estudio de la administración intranasal de una citoquina, una pequeña molécula del sistema inmunitario, la interleuquina-2 (IL-2), en el tratamiento de pulmón. Confirmados sus resultados positivos, se pasó a los ensayos de la IL-2 inhalada para su aplicación en pacientes humanos con metástasis en pulmón; éstos llevaron luego a pruebas con otra citoquina, el factor estimulante de colonias de granulocitos. Los animales domésticos permiten dar con la dosis y protocolo óptimos de fármacos sometidos a ensayos en humanos.

Otro reto que los perros están ayudando a superar es la determinación del estadio o fase de un tumor (estadificación clínica). La evaluación exacta del estadio resulta crítica para el plan de actuación terapéutica y lograr, por ende, el mayor beneficio para el paciente, con el recorte consiguiente en el tiempo de exposición a tratamientos severos ineficaces en una fase determinada de la enfermedad. A modo de botón de muestra: la probabilidad de supervivencia de un adolescente con osteosarcoma aumenta si se realiza una identificación precisa de las metástasis en pulmón y su eliminación quirúrgica.

La presencia y extensión de esas metástasis suelen determinarse mediante técnicas de formación de imagen no invasivas, como la tomografía axial computarizada (TAC). Con objeto de evaluar la exactitud de dicho método, uno de los autores (Waters), en colaboración con investigadores de la Universidad de Indiana, reunió imágenes de TAC de los pulmones de perros con metástasis de cáncer óseo. Se realizaron luego autopsias para verificar que lo que se había interpretado como "tumor" en las imágenes correspondía realmente a un tumor. Los resultados pusieron de manifiesto que la TAC —la misma técnica que se usa en la estadificación clínica del osteosarcoma en adolescentes— subestimaba el número de focos de cáncer en el interior del pulmón. Al poner de relieve la fiabilidad limitada de las técnicas disponibles y en desarrollo, los perros contribuyen a la optimización de la próxima generación de métodos de detección del cáncer.

Prevención del cáncer

Pero los oncólogos tienen otros puntos de mira. No trabajan sólo para mejorar la detección y el tratamiento de la enfermedad. Se proponen avanzar en la prevención, un dominio bastante nuevo en oncología, por sorprendente que parezca.

Desde hace tiempo, los cardiólogos saben que la prevención de la enfermedad cardíaca salva millones de vidas. Lo mismo cabe predicar de la oncología. El término "quimioprevención" se acuñó hace treinta años para referirse a la administración de fármacos que evitaban el cáncer, pero hasta octubre de 2002 no se celebró ninguna reunión de expertos donde se presentaran y revisaran los últimos avances en prevención del cáncer.

La investigación en prevención ha cobrado auge. Se está examinando una batería de potenciales agentes protectores contra el cáncer. Pero la determinación de la dosis farmacológica óptima ha constituido desde siempre un reto. Algunos de los primeros ensayos de agentes preventivos en humanos resultaron desastrosos. En dos ensayos clínicos extensos sobre prevención del cáncer de pulmón, los pacientes que habían recibido altas dosis de betacaroteno, un nutriente antioxidante, mostraron un incremento inesperado en la incidencia de cáncer de pulmón en comparación con los individuos de control tratados con placebo.

¿Pueden acelerar los perros el progreso en la prevención del cáncer? En fecha reciente, la investigación en cánidos ha permitido acotar la dosis de selenio, un oligoelemento antioxidante que minimiza el daño génico causante de cáncer de próstata en hombres de edad avanzada. Este ha sido el mensaje de los perros: cuando se trata de tomar suplementos dietéticos, como el selenio, para reducir el riesgo de cáncer, más cantidad de algo bueno no resulta necesariamente en algo mejor. Los perros viejos a los que se habían administrado dosis moderadas de selenio terminaron con menos daño génico en su próstata que los que habían recibido cantidades inferiores o superiores. Los oncólogos sostienen que la investigación en perros previa a los ensayos a gran escala en humanos facilita la determinación de la dosis más eficaz de los agentes preventivos.

Durante años, el empleo de perros en el laboratorio impulsó el conocimiento de los efectos agudos y crónicos de las dosis elevadas de compuestos cancerígenos. En su vida doméstica, estos animales servirían como centinelas para la identificación, en nuestra casa, de sustancias que resultan carcinogénicas a dosis bajas. Si algo causa cáncer, la enfermedad aparecerá en los perros mucho antes que en las personas (debido a su tiempo de vida abreviado, en comparación con el nuestro).

Sea por caso el amianto. El mesotelioma humano (enfermedad maligna de los tejidos que tapizan el tórax y el abdomen) tiene, casi siempre, su

JANA BRENNING

origen en la exposición al amianto. Los síntomas aparecen hasta 30 años después de la exposición. Se ha descubierto que también el mesotelioma canino guarda relación con el amianto (muy probablemente al hallarse el perro cerca de un amo que estuvo a su vez en contacto con este mineral). Pero en los perros el intervalo de tiempo entre la exposición y el diagnóstico es menor: inferior a ocho años. Por tanto, la aparición del cáncer en un perro constituye una señal de alarma, que debería hacernos detectar y remediar cualquier fuente de amianto. Asimismo, un estudio más completo de los individuos expuestos podría conducir a diagnosis precoces de mesotelioma, lo que convertiría estos cánceres en curables.

Los perros servirían de ayuda para el descubrimiento de otros factores de riesgo ambientales. Algunos “puntos calientes” muestran una incidencia anómala, por lo elevada, de determinados tumores. Por ejemplo, las mujeres que viven en Marin County, en California, presentan la mayor incidencia de cáncer de mama en los Estados Unidos. Para identificar los factores cancerígenos en puntos calientes se recurre a la comparación de la genética y el estilo de vida de los individuos afectados con los exentos. Estos estudios se refuerzan ahora con el registro del cáncer canino en esas áreas. Si los animales domésticos y las personas de una comunidad experimentan una incidencia de cáncer por encima de lo normal, cabe sospechar de la presencia de algún factor ambiental culpable.

El análisis de los tejidos de los perros podría incluso acelerar la identificación del factor de riesgo. Numerosos compuestos tóxicos (plaguicidas, por ejemplo) se concentran en la grasa corporal. Revestiría, pues, sumo interés tomar muestras de tejidos de perros durante operaciones quirúrgicas rutinarias (como una esterilización) o en autopsias. Más tarde, si un número elevado de personas en un área determinada desarrollara cierto tipo de cáncer, se

Resistencia al cáncer: lecciones de los ancianos

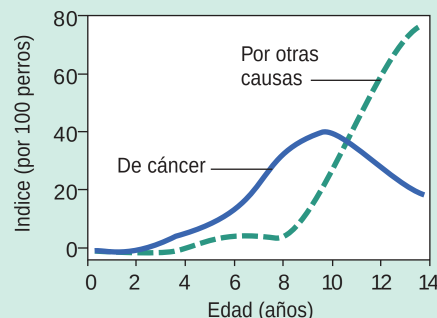

Anvil, 13 años

El riesgo para la mayoría de cánceres humanos y caninos aumenta con la edad. Tendencia que ha inducido a pensar que el cáncer constituye el resultado de la acumulación de alteraciones génicas con el transcurso del tiempo. Pero la investigación reciente en personas que han llegado a los 100 años de edad revela una paradoja intrigante: los más ancianos presentan una probabilidad de sucumbir al cáncer menor que la de personas que mueren a los 70 o a los 80 años. ¿Comparten los canes más viejos una resistencia similar a la mortalidad por cáncer?

Para responder a esta pregunta, el autor y sus colaboradores confeccionaron el historial médico de una muestra extensa de perros de raza rottweiler que vivían en América del Norte. Entrevistaron a dueños y veterinarios. Hallaron que la probabilidad de morir de cáncer en los dos años siguientes aumentaba con la edad durante la etapa adulta hasta que los perros alcanzaban unos 10 años, pero caía en adelante. Los perros excepcionalmente viejos (mayores de 13 años) mostraban una probabilidad de morir de cáncer menor que los perros con una longevidad normal, aunque el riesgo de morir por otras causas continuaba subiendo.

Estas observaciones plantean la posibilidad de que la comparación de los perros más viejos con los que presentan una longevidad normal revele la identidad de los genes que regulan la resistencia al cáncer. Las variaciones génicas (polimorfismos) responsables de la resistencia al cáncer y la excepcional longevidad en los perros se evaluarían entonces para ver si las mismas estaban también sobreexpresadas en los

Indice de muertes en los rottweilers



PARA LOS ROTTWEILERS que viven más de 10 años, envejecer significa gozar de mayor probabilidad de librarse de morir de cáncer.


Grace Fair, 103 años

humanos ancianos. De ser así, los expertos pueden abordar las interacciones moleculares reguladas por estos genes que alteran la sensibilidad de los tejidos al cáncer.

La naturaleza de la resistencia al cáncer en humanos centenarios no está definida. Se trabaja con ahínco sobre autopsias de los perros más viejos para dilucidar la cuestión. Se busca determinar si la resistencia al cáncer constituye el reflejo de una supresión completa de los acontecimientos biológicos que dan lugar al cáncer —por ejemplo, mediante un aumento en la reparación del daño en el ADN— o si se producen tumores, aunque son benignos. Una mejor comprensión de las bases genéticas y patológicas de la resistencia al cáncer en los individuos más longevos facilitará el desarrollo de estrategias para la prevención de esta enfermedad.

CORTESIA DE DONNA RICE (*rottweiler*); CORTESIA DE LA SOCIEDAD CENTENARIA DE NUEVA INGLATERRA (*mujer*)

analizaría la concentración de distintos compuestos químicos en las muestras caninas para ver si alguno abunda en particular y merece la pena estudiar, por tanto, su actividad cancerígena.

Resistencia al cáncer

Dada su incidencia frecuente en los perros, podrían éstos colaborar en la resolución de un viejo enigma. Todos sabemos de familiares que fumaban dos paquetes de cigarrillos al día y nunca padecieron cáncer de pulmón. ¿Qué factores determinan la resistencia al cáncer? Para obtener una respuesta hemos de encontrar poblaciones resistentes al cáncer y estudiarlas de cerca: su genética, su dieta y su estilo de vida.

Las personas centenarias constituyen una de esas poblaciones. La mayoría de los que llegan a los 100 años muere de enfermedades distintas del cáncer. Sin embargo, resulta casi imposible sacarle información a una mujer de 102 años acerca de la dieta que seguía y la actividad física que realizaba cuando era una adolescente o a mitad de los 40. Por ello, uno de los autores (Waters) enfocó la cuestión desde otro punto de vista: ¿opera también en los perros este fenómeno de resistencia al cáncer en los más ancianos?

La respuesta es afirmativa. A partir de entrevistas con dueños de canes muy viejos, los oncólogos han elaborado la historia vital de perros "centenarios". Combinemos esta información con el almacenamiento de muestras biológicas (por ejemplo, sangre para análisis genéticos, metabólicos y fisiológicos) obtenidas de canes muy viejos y de varias generaciones de su progenie: tendremos un banco de pruebas único para la exploración de los factores génicos y ambientales que determinan la resistencia al cáncer.

El rompecabezas de la resistencia al cáncer podría abordarse a través del análisis de sensibilidad diferente que ante los tumores muestren perros y humanos. En las personas, la obesidad y las dietas ricas en grasa animal aumentan el riesgo de cáncer de colon. Por el contrario, el cáncer colorrectal es raro en los perros, aun cuando muchos son obesos y siguen una dieta con contenido graso elevado.

JANA BRENNING

Los expertos consideran ahora la posibilidad de emplear perros como un "modelo negativo" del cáncer de colon, con la esperanza de identificar factores que confieran resistencia a las personas cuyo estilo de vida favorece el desarrollo de la patología. El conocimiento de los factores de resistencia sugeriría nuevas actuaciones para los individuos no resistentes.

Un esfuerzo en aumento

Históricamente, la investigación en oncología comparada se ha llevado a cabo en hospitales universitarios y laboratorios donde se forman los oncólogos veterinarios. Sin embargo, al reconocer los beneficios potenciales para la salud humana, otras instituciones han empezado a implicarse de manera activa en este campo de investigación.

La Fundación Gerald P. Murphy para el Cáncer comenzó en 2001 a acelerar el desarrollo de métodos para la prevención y el tratamiento de los cánceres de próstata y de huesos que afectaban a personas y perros. La Fundación del Cáncer en Animales de Nueva York ha financiado estudios de oncología comparada y ha establecido un banco de muestras biológicas de animales enfermos y sanos. En 2003, el Instituto Nacional del Cáncer estadounidense desarrolló el Programa de Oncología Comparada, que diseña ensayos en los que participan perros con cánceres no inducidos; también proporciona reactivos de alta calidad, específicos de perros, necesarios para el estudio de la biología molecular, química de proteínas y genética de los tumores caninos.

Además, se ha completado la secuenciación del genoma canino. Si se descubre que un gen concreto está implicado en alguna forma de cáncer canino, podrá determinarse si el mismo gen opera en los cánceres humanos, para abordar su mecanismo de acción. Los terrier escoceses con cáncer de vejiga, los rottweilers con cáncer de hueso y los perros labradores con el linfoma, cada raza ayudaría a elucidar las combinaciones de genes y ambiente cancerígenas.

Desde luego, existen limitaciones inherentes en el empleo de animales para mimetizar el cáncer humano, se trate de roedores, perros u otras especies. No existe ningún modelo animal ideal para el cáncer. La mejor ciencia se hace mediante el planteamiento de buenas preguntas y el uso posterior de los instrumentos de investigación con mayores probabilidades de proporcionar respuestas con sentido. La aplicación de este principio a la oncología significará, en ocasiones, volver a los perros, en busca de estos conocimientos difíciles de obtener.

Las intrigantes semejanzas entre el cáncer humano y el canino —antaño una mera curiosidad— se aplican hoy de forma sistemática para transformar el cáncer, letal, en una enfermedad superable. Los expertos en oncología comparada no se dedican a inducir cáncer en animales, sino que tratan a perros que sufren de los mismos tipos de cánceres letales que se desarrollan de forma natural en el hombre.

Los autores

David J. Waters imparte clases de oncología comparada en la Universidad de Purdue. **Kathleen Wildasin** se dedica a la divulgación científica.

Bibliografía complementaria

EXCEPTIONAL LONGEVITY IN PET DOGS IS ACCOMPANIED BY CANCER RESISTANCE AND DELAYED ONSET OF MAJOR DISEASES. D. M. Cooley, D. L. Schlitter, L. T. Glickman, M. Hayek y D. J. Waters en *Journal of Gerontology*, vol. 58, n.º 12, págs. B1078–B1084; 2003.

PHASE I DOSE-ESCALATING STUDY OF SU11654, A SMALL MOLECULE RECEPTOR TYROSINE KINASE INHIBITOR, IN DOGS WITH SPONTANEOUS MALIGNANCIES. C. A. London et al. en *Clinical Cancer Research*, vol. 9, págs. 2755–2768; 2003.

HERBICIDE EXPOSURE AND THE RISK OF TRANSITIONAL CELL CARCINOMA OF THE URINARY BLADDER IN SCOTTISH TERRIERS. L. T. Glickman, M. Raghavan, D. W. Knapp, P. L. Bonney y M. H. Dawson en *Journal of the American Veterinary Medical Association*, vol. 224, n.º 8, págs. 1290–1297; 2004.

SPONTANEOUS AND GENETICALLY ENGINEERED ANIMAL MODELS: USE IN PRECLINICAL CANCER DRUG DEVELOPMENT. K. Hansen y C. Khanna en *European Journal of Cancer*, vol. 40, págs. 858–880; 2004.

Nómadas de Eurasia: una “civilización” de las estepas

Desde la Antigüedad, numerosos pueblos nómadas han ocupado la estepa euroasiática. De orígenes étnicos distintos, han compartido un comportamiento guerrero y rasgos culturales de gran riqueza. ¿Definen por ello una civilización?

Iaroslav Lebedynsky

“Los sármatas cabalgan por vastas llanuras [...]. Su barbarie es tal, que ni entienden la noción de paz.”

De ese modo el historiador romano Floro describía a los sármatas en época de Augusto. Podríamos casi superponer, palabra por palabra, las descripciones realizadas a lo largo de los tiempos por los escritores griegos, romanos, chinos, incluso persas e hindúes, sobre sus molestos vecinos nómadas: bárbaros, lobos, errantes por las fronteras del mundo civilizado y aguardando la ocasión de lanzarse sobre él. Nuestra forma de escribir la historia constituye aún un fiel reflejo de estas ideas, sobre todo en la tradición francesa, marcada todavía por el recuerdo de la invasión de Atila.

Sin embargo, los pueblos nómadas de Eurasia no fueron sólo destructores. Desarrollaron culturas ricas, emparentadas entre sí, de tal manera que no resulta exagerado considerarlas el equivalente de lo que entre los grupos sedentarios denominamos civilización. A pesar de conocerse desde el siglo XIX, queda mucho por desentrañar, lógico en una realidad que abarca 15 siglos de historia y se extiende por el espacio inmenso y dispar de las estepas eurasiáticas. Iremos presentando aquí los resultados de más de un siglo de investigaciones arqueológicas sobre la civilización esteparia y su legado.

Las culturas nómadas de Eurasia se desarrollaron en un inmenso espacio que comprende las estepas de Europa (central y oriental) y de Asia (una estepa herbácea, con límites boscosos al norte y áridos al sur), amén de sus regiones limítrofes montañosas (Urales, Altai, Pamir) y desérticas. Las grandes civilizaciones sedentarias prosperaron en los límites de la estepa a lo largo de todas las épocas; con ellas mantuvieron intercambios continuos los nómadas.

El nómada suele ser considerado, por el sedentario, un primitivo incapaz de practicar la agricultura o de edificar una casa. Pero la realidad es distinta, y ello constituye una de las conclusiones más interesantes de la arqueología: los nómadas son los herederos de ciertas culturas sedentarias.

En la transición entre la edad del Bronce y la edad del Hierro, hacia los albores del milenio I antes de nuestra era, las poblaciones de ganaderos y agricultores de las estepas euroasiáticas abandonaron sus poblados —¿se había endurecido demasiado el clima?— y se especializaron en una ganadería nómada extensiva. Su habilidad como jinetes, indispensable en este tipo de economía, los convirtió también en guerreros diestros y escurridizos, lo que les otorgó un papel destacado en la historia de Eurasia.

Las grandes oleadas nómadas

La civilización de las estepas incluye pueblos distintos, con diferencias de lengua, de pertenencia étnica e incluso de creencias. Simplificando una historia constituida por innumerables migraciones y mezclas, podemos distinguir, en primer lugar, un período de hegemonía iraní (“escita”) sobre la mayor parte de las estepas euroasiáticas, que comprende desde el siglo VIII hasta el III a.C. En una segunda etapa, los nómadas originarios de la zona iraní



1. LOS ANIMALES, sobre todo el ciervo, centraban buena parte del arte de las estepas, desde Europa central hasta China.

IAROSLAV LEBEDYNSKY

fueron empujados de forma progresiva hacia el oeste, hacia las estepas europeas, por sus rivales turco-mongoles (entre el siglo III a.C. y el IV d.C.). Por fin, tenemos un período de dominación de estos turco-mongoles sobre el mundo nómada, desde los siglos IV y V d.C. hasta la conquista de las estepas por los imperios sedentarios, sobre todo el ruso y el chino, ya en época moderna.

Las primeras potencias nómadas surgieron de poblaciones de posible origen europeo —lo evidencian sus vestigios— y de lengua indoeuropea, esencialmente iraní, como lo demuestra el análisis de los nombres propios y de algunos términos conservados de estas lenguas. Si bien sigue siendo controvertida la identidad etnolingüística de los misteriosos cimerios (siglos IX-VII a.C.), podemos vincular esta rama iraní, calificada de escita, a varios grandes pueblos nómadas de la Antigüedad. Los escitas fueron sus principales representantes, entre los siglos VII y III. Los escitas *sensu stricto* vivieron en las estepas ucranianas; sus primos, los saces y los masagetas, en Asia central.

Conocemos con precisión las culturas nómadas del período escita merced a los descubrimientos arqueológicos realizados desde el siglo XVIII hasta hoy mismo. Se presentan bajo formas similares desde Hungría hasta el norte de China, pasando por las estepas de Europa oriental, del Kazajstán y de Siberia, Asia central y Mongolia. En el transcurso de los siglos previos a la era cristiana, los escitas de Europa fueron sustituidos por los sármatas; más tarde, a inicios de nuestra era, por los alanos. Al propio tiempo, la presión creciente de los nómadas turco-mongoles en Asia septentrional provocó diversas migraciones, como las que condujeron a los saces a Bactriana y al norte de la India, amén del grupo que los chinos llamaban Yuezhi y que probablemente fueran también originarios de la comunidad de pueblos de lengua iraní.

A partir del siglo III a.C. los nómadas del grupo escita entraron en competencia con pueblos dotados de un componente mongoloide dominante o principal, que hablaban mayoritariamente lenguas de la familia altaica (turco-mongol-tungús). Su expansión se inicia bajo los xiongnu de Mongolia, adversarios de la China de la dinastía Chin, y después de los Han, que edificaron a finales del siglo III a.C. un imperio tan vasto cuan efímero en las estepas asiáticas. La expansión alcanzó las estepas europeas a finales del siglo IV de nuestra era, con la irrupción de los hunos (emparentados o no con los xiongnu), cuya clase dirigente parece ser que hablaba una lengua turca.

Desde el siglo VI, la hegemonía de los nómadas de lengua turca no encontró resistencia en las estepas y amplias zonas limítrofes de Asia (con los turcos, uighures, oghuz, etcétera) y Europa (donde se sucedieron protobúlgaros, khazares, petchenegos, cumanos o polovtes). Dicha superioridad sólo fue cuestionada, y de manera breve, por la extraordinaria aventura de los mongoles, creadores en el siglo XIII del mayor de los imperios de la historia. La fuerza de los mongoles se asentaba en buena medida en la colaboración voluntaria u obligada de los pueblos turcos. Tras este paréntesis, el elemento turco retomó el poder en las estepas, hasta que su expansión culminó al oeste con la creación de otro gran imperio, en este caso sedentario: el Imperio Otomano.

Al margen de las etnias de los pueblos de lengua iraní y de las turco-mongolas, debemos añadir a este panorama un pueblo surgido de la familia lingüística de los Urales ("ugro-finesa") que marcó igualmente la historia de las estepas y de Europa: los magiares. Ellos conquistaron la cuenca de los Cárpatos a finales del siglo IX d.C., lo que dio origen a Hungría.

La "civilización" de las estepas

La diversidad de pueblos nómadas contrasta con las semejanzas que existen entre sus culturas. El parecido se mantuvo a través del espacio y del tiempo, hasta el punto de que los ritos funerarios descritos por Herodoto, a propósito de los escitas de Ucrania del siglo V a.C.,



2. ESTEREOTIPO DEL NOMADA invasor y destructor en una imagen del siglo XIX. Esta visión, que ha perdurado sobre todo en Occidente, se debe a la invasión de los hunos, representada aquí de manera fantasiosa con unos personajes de aspecto vagamente mongol.



3. DETALLE DE UN PECTORAL de la tumba real escita de Tovsta Mohyla en Ucrania. Dos personajes están despellejando un animal. Sus rasgos son característicos de los nómadas de la comunidad de pueblos de lengua iraní que dominaron las estepas en la Antigüedad. La calidad

hallan aún sus ecos en un texto de Ibn Battuta, que describe a los mongoles del siglo XIV d.C. Estos paralelos no se deben al azar. Van más allá de los efectos mecánicos derivados de un modo de vida común. Nos hallamos, sin duda, ante una misma civilización, cuyas bases fueron implantadas por los pueblos "escitas" a inicios de la edad del Hierro y luego adoptadas y desarrolladas por poblaciones de otros orígenes. Las innovaciones se propagaron rápidamente entre los nómadas, gracias a la fluidez del mundo estepario y a las incesantes migraciones.

El nomadismo condiciona numerosos aspectos de la civilización de las estepas. Esta forma de vida no procede de un comportamiento arcaico, sino de una especialización económica, mucho más compleja que la imaginada por los sedentarios. Salvo durante las migraciones, los ganaderos nómadas solían seguir un ciclo anual de trashumancia entre zonas de pastos fijas, siguiendo itinerarios establecidos. La composición de la cabaña estaba adaptada a esta movilidad, con un predominio de caballos y de ganado ovino. Los nómadas mostraban afición sobre todo por los caballos; en varias culturas, acompañaban a su dueño hasta la tumba.

Los animales proporcionaban la parte esencial de la alimentación y la bebida favorita de los nómadas. Herodoto describe ya el proceso de elaboración de la leche de yegua fermentada, conocida como *kumis* en las lenguas turcas. Los productos derivados (cuero, lana y fieltro, cuernos, huesos, etcétera) se utilizaban en las actividades artesanales. Numerosos nómadas practicaban también una agricultura estacional complementaria. En su mayoría comerciaban. Los escitas, los sármatas y muchos otros, mongoles incluidos, se esforzaban por controlar las vías comerciales y abrir otras nuevas.

Los nómadas mantenían contactos continuos con las poblaciones sedentarias a las que a menudo dominaban en el plano militar; es más, establecieron con ellos un tipo de simbiosis económica. Se observa también que el sistema nómada no excluía cierto control permanente sobre el territorio. Los escitas, y luego distintos pueblos turcos, edificaron asentamientos fortificados, que servían de campamento militar para el control del territorio, de "capital" política y de centro manufacturero y comercial. Algunos de estos pueblos nómadas llegaron a levantar auténticas ciudades.

De hecho, una de las evoluciones más frecuentes del nomadismo de las estepas ha sido su paso a un seminomadismo, con la sedentarización de una parte de la población. En Hungría, "extremo" occidental de las estepas, donde el espacio reducido ya no permitía la ganadería móvil tradicional, los sármatas (s. I al IV), lo mismo que los hunos en el siglo V, o los ávaros en el VI, se sedentarizaron por completo; aun así, conservaron la esencia de su herencia cultural. Diversos pueblos nómadas tomaron las riendas de imperios sedentarios, como los tabghatch y los qidan, que fueron después los mongoles gengiskánidas que acabaron creando las dinastías "chinas".

Los nómadas habitaban, según los pueblos y las épocas, en carros (cuyo interior se compartimentaba en habitaciones) o en tiendas, denominadas impropiamente "yurts". De estructura ligera, las tiendas eran fácilmente desmontables y transportables. Sobre su uso por los sármatas hay documentación desde los albores de nuestra era (aunque sin duda existían ya con anterioridad). El modelo de tienda apenas ha variado desde entonces; en ocasiones se sumaban chozas. Los hallazgos realizados en las tumbas "heladas" de época escita, en el Altai, muestran que los antiguos nómadas se rodeaban de ciertos lujos decorativos y de una comodidad innegable: alfombras, cojines, etcétera.

La necesidad de desplegarse sobre un vasto territorio para sostener una ganadería de grandes rebaños en semilibertad determinó que casi siempre existiera una





en la realización de esta escena ilustra la maestría de los artesanos nómadas, que, a menudo, lo mismo en curtidos que en metalurgia superaba a la de los sedentarios. Dan fe de ello sus armas, que los ejércitos de los imperios sucesivos copiaron de forma sistemática.

4. "CAMPAMENTO KIRGHIZE en el valle del río Tchou". Este cuadro de V. Verechtchaguine presenta todos los atributos idílicos del mundo nómada: vida en la naturaleza, yurta y caballos omnipresentes. Un modo de vida que apenas ha cambiado durante 2000 años.

IAROSLAV LEBEDYNSKY

estructura política flexible y abierta: confederaciones extensas de tribus dirigidas por una "tribu real" dominante. Los imperios centralistas de las estepas constituyen la excepción, cuando no un mito. Incluso el imperio de Gengis Khan, en el que se había desarrollado de forma progresiva una ideología de dominación mundial, acabó desmoronándose apenas unas décadas después de la muerte del fundador.

La organización social de los pueblos nómadas se muestra fundamentalmente idéntica: un clan real, en ocasiones sacralizado, una aristocracia que aporta los dirigentes militares y que detenta la mayor parte de las riquezas, y los hombres libres. Podían existir esclavos, pero en cualquier caso su importancia económica era menor. A diferencia de las grandes civilizaciones sedentarias de la antigüedad, las sociedades nómadas no ejercían la esclavitud. Las mujeres gozaban de un alto grado de libertad; podían incluso reinar. Su participación en las actividades guerreras aparece documentada en varios pueblos escitas y turcos.

Amén de ganadero, el nómada de las estepas guerreaba. Terror de sus vecinos sedentarios, combatía sobre todo como arquero a caballo. Sus tácticas principales (acoso del enemigo, ataques sorpresa, retiradas simuladas, utilización de carros dispuestos en círculo como defensa móvil en espacios desprovistos de obstáculos naturales) se describen ya desde el período escita; continuaron hasta la época moderna. Hacia los siglos IV y III a. C., advino, en Asia central, una caballería pesada de lanceros con corazas, constituida por los aristócratas de las tribus, que tenía por misión principal asestar al enemigo el golpe decisivo en los combates.

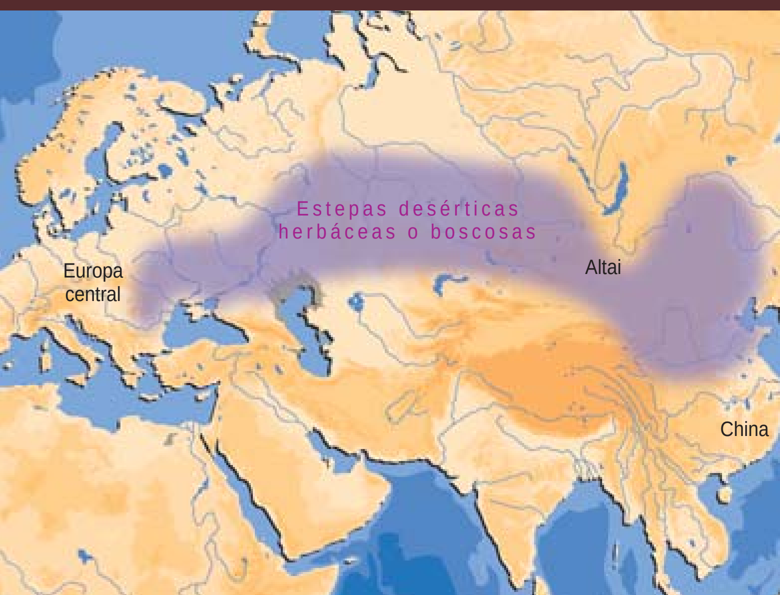
Costumbres guerreras y ritos sagrados

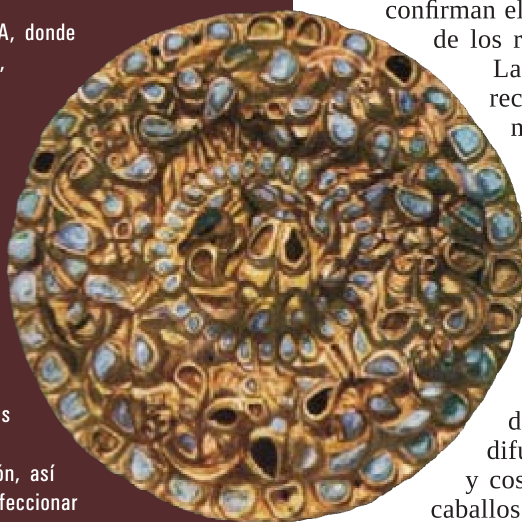
El armamento de los nómadas solía ser superior al de sus adversarios sedentarios, hasta que aparecieron las armas de fuego portátiles. Destacaba el arco utilizado en las estepas, un artefacto muy elaborado. De tamaño pequeño (entre los escitas) o de proporciones imponentes (entre los hunos y los mongoles), el arma se basaba en la combinación de materiales con propiedades distintas (madera, láminas de cuerno, tendón seco, placas de hueso), que lo convertían en un instrumento potente y resistente a la vez, a pesar de su morfología en corchete. Su dureza se debía a que, antes de encordarlo, la madera estaba curvada al revés; la fuerza que se necesitaba para colocarle la cuerda se transformaba en energía en el momento del disparo. Se obtenía así un arma menos voluminosa que un arco recto y más adecuada para el tiro a caballo. En un cierto momento, el equipamiento bélico de los diferentes pueblos nómadas era casi el mismo de un extremo al otro de las estepas.

Entre numerosas culturas nómadas se daba la costumbre de conservar trofeos humanos. Se halla documentada desde la época escita hasta la Edad Media y confirmada por la iconografía y la arqueología. En la mayoría de los casos se trataba de cabelleras o cabezas. Narra Herodoto que los escitas coleccionaban pieles humanas enteras, o pedazos de las mismas, que utilizaban en la confección de objetos diversos.

Los pueblos nómadas profesaron creencias diferentes según su pertenencia etnolingüística. Por lo que sabemos sobre la religión de los pueblos escitas de la Antigüedad, debía aquélla guardar relación, por su estructura general, con la religión de los iraníes sedentarios y la de otros grandes pueblos indoeuropeos. Los sistemas religiosos de los nómadas de lengua altaica, turcos o mongoles, se fundaban sobre otras bases; estaban dominados por el Tängri, el cielo azul divinizado. También eran distintas las creencias de los magiares, cuyo origen debe situarse en los Urales.

Adviértase que, si bien los panteones y las teologías no coincidían, la mayoría de las religiones tradicionales practicadas por los pueblos nómadas presentaban elementos





5. LA ESTEPA EUROASIATICA, donde nació una civilización genuina, corresponde a una inmensa franja de terreno que une el norte de China con Europa central (*arriba, en violeta*). Su inmensidad explica que el caballo y el jinete hayan desarrollado siempre una función básica: en la imagen inferior, un jinete escita está atando las patas delanteras de un caballo ensillado. Los nómadas obtenían de sus rebaños la mayor parte de la alimentación, así como los elementos para confeccionar vestidos, útiles y armas. En la imagen de la izquierda, un fieltro con colores vivos de una manta de silla de montar procedente de Pazyryk, en el Altai ruso. Este tipo de mantas se continúan tejiendo hoy en Asia central. Artesanos sin igual, los nómadas fueron excelentes orfebres. La imagen de la derecha muestra una decoración basada en animales y jalonada de turquesas; pertenece a una joya de la "colección siberiana" del Museo de San Petersburgo. Es muy representativa del estilo desarrollado en Asia central y en Siberia y por los sármato-alanos de Europa oriental durante los primeros siglos de nuestra era.



IAROSLAV LEBEDYNSKY

y ritos comunes, sobre todo en el ámbito funerario. Se percibe de forma general el eco de lo que se ha calificado, con cierta precipitación, de chamanismo; un ejemplo sería el uso ritual de sustancias psicotrópicas, evidenciado en la presencia de semillas de cáñamo y de utensilios de inhalación en tumbas de la época escita en el Altai. Es posible que el término mismo de cannabis sea de origen escita; habría llegado a nosotros a través del griego.

Las prácticas nómadas más sorprendentes se relacionan con la arquitectura y los ritos funerarios. Si bien la incineración fue el rito funerario preferido entre ciertos pueblos turcos, la inhumación se encontraba mucho más extendida. El difunto se enterraba (según el caso, en un sarcófago o en una cámara funeraria) vestido y armado, con un ajuar que reflejaba su estatus social. En numerosas ocasiones le acompañaba su caballo; en el caso de determinados personajes de alto rango, también otras monturas. Entre determinados pueblos se añadía un cortejo humano: esposa o concubina, sirvientes, "guardias", etcétera. Las excavaciones llevadas a cabo en Ucrania confirman el relato de Herodoto sobre los funerales de los reyes escitas.

Las tumbas individuales o colectivas eran recubiertas por un túmulo o kurgán (término ruso de origen turco que ha adoptado el lenguaje común de la arqueología). Las sepulturas de los escitas, y más tarde las de diversos pueblos turcos, podían estar coronadas por una estatua de piedra que representaba, más que al propio difunto, a un antepasado. Alrededor de los kurganes reales, los escitas colocaban, según Herodoto, un falso escuadrón de caballos disecados, montados por jinetes del ejército del difunto sacrificados por estrangulamiento y cosidos a la montura (la presencia de los caballos se ha confirmado por las excavaciones arqueológicas). Por su parte, determinados pueblos altaicos se conformaban con exponer las pieles de los caballos suspendidas en varas. Entre los escitas, el duelo se acompañaba de automutilaciones, documentadas posteriormente entre los hunos y los turcos.

Todos los pueblos nómadas de la Antigüedad estuvieron en contacto con formas de escritura, aunque no prodigaran su empleo. En cada ocasión en que un pueblo nómada constituyó un "imperio" y se vio obligado a implantar una administración o una cancillería, utilizaron una lengua escrita clásica (el chino en el caso de los xiongnu, el griego y el latín en el caso de la correspondencia diplomática de Atila) o desarrollaron un sistema de escritura de su propia lengua. Los turcos elaboraron un alfabeto fonético, utilizado en sus diversas variantes por distintos grupos de la comunidad turcófona; los mongoles adoptaron el alfabeto uighur.

La tradición oral era extremamente rica. Teniendo en cuenta los múltiples vínculos existentes entre las distintas partes de las estepas, así como el gran conservadurismo cultural de los pueblos nómadas, es probable que exista un fondo común, sobre todo de carácter épico. La tradición oral de los pueblos escitas ha llegado hasta nosotros a través de alusiones de los autores antiguos;

sobre todo gracias al reflejo que de ella nos proporcionan los relatos épicos de los osetios y de sus vecinos del Cáucaso septentrional, cuyos restos más antiguos se remontan a los escitas y a los sármato-alanos. La tradición oral de los pueblos turcos y mongoles se ha conservado parcialmente hasta nuestros días.

El arte decorativo de los nómadas, el arte de las estepas, constituye en la actualidad uno de los aspectos más valorados de dicha civilización. El arte de la época escita, dinámico y expresivo, se basa en las figuras animales; los temas principales (felinos, rapaces y especialmente ciervos) y una estilización característica se producen en todo el ámbito estepario. En Siberia y Asia central, y luego entre los sármatas de Europa oriental, los motivos animales destacaron por sus incrustaciones policromas, en ocasiones abundantes; más adelante, ya en los siglos IV y V, y sobre todo entre los hunos, las decoraciones de vivos colores tendieron a la abstracción. Esta preferencia por el colorido se observa todavía en la joyería turkmena actual. La inspiración basada en las figuras animales dejó también sus huellas, aunque de forma más discreta, en el arte de los pueblos turcos y mongoles de la Edad Media, e incluso de época moderna. La civilización de las estepas persiste hoy, en Mongolia y en determinadas partes de Asia central, pero bajo una forma residual y empobrecida. Sin embargo, aunque sus vestigios vivos sean misérrimos, las etapas de esplendor del pasado nos han legado una rica herencia cultural.

Las técnicas de caballería

Los nómadas de la estepa euroasiática estuvieron en contacto con culturas sedentarias de los lindes de sus territorios: las grandes civilizaciones occidentales (Grecia y Roma), las del Próximo Oriente (Mesopotamia y después Persia), las de la India y de China, y las culturas de distintos grupos bárbaros, tales como los germanos y los eslavos en Europa. Los nómadas adoptaron elementos culturales de estas civilizaciones en diversos ámbitos, desde la escritura y la agricultura hasta la conversión a las grandes religiones: el cristianismo, el islamismo, el budismo y, en un caso excepcional (los khazares entre los siglos VIII y IX), al judaísmo. Pero los intercambios no se produjeron en un solo sentido; la civilización de las estepas también dejó huella entre sus vecinas.

El elemento más evidente de esta herencia se encuentra en las técnicas de caballería. Si el caballo se había domesticado desde el Neolítico, el desarrollo del nomadismo estepario coincidió con la difusión de la equitación y de la función militar de la caballería. Los nómadas elaboraron, o difundieron, numerosas innovaciones: probablemente el bocado metálico partido, aparecido a inicios de la edad del Hierro, posteriormente la silla rígida con armazón de madera (introducida en Europa por los hunos) y el estribo.

Los pueblos y grandes imperios que conocieron y se enfrentaron a los guerreros de las estepas adoptaron sus armas, sus equipamientos e incluso sus tácticas, por no mencionar la utilización de mercenarios o aliados nómadas. Desde finales del siglo IV a.C., los chinos copiaron la caballería de los bárbaros hu de Mongolia. El Imperio Romano tomó de sármatas y partos la caballería pesada, adoptando incluso su impresionante estandarte del dragón, especie de mancha de aire que emitía un alarido siniestro en el momento de la carga. De manera indirecta, los nómadas constituyeron así el prototipo de caballero con coraza carolingio y de caballero medieval con armadura. También el sable, que se convirtió en el arma universal hasta los primeros decenios del siglo XX, constituye una herencia de las estepas. Las hojas, largas láminas de sólo un filo cortante, fueron desarrolladas por los ávaros y los pueblos turcos, a partir de la antigua espada larga.

Huella militar, lingüística y mítica

Podemos reconocer una profunda huella escita entre los pueblos eslavos y entre diversos pueblos del Cáucaso septentrional. El vocabulario eslavo refleja el prestigio de que gozaron, durante toda la Antigüedad, sus vecinos y dominadores escitas, sármatas y alanos; refleja también los contactos entre los eslavos orientales y los alanos sedentarizados del período posterior a los hunos, que continuarían hasta la Edad Media. Términos eslavos como *dios, santo, paraíso, señor*, o el nombre de varias divinidades eslavas, corresponden a préstamos lingüísticos de pueblos de lengua iraní de las estepas de Europa oriental. En el Cáucaso septentrional, la arqueología, la lingüística y la etnografía coinciden en mostrar el impacto reiterado de los mismos escitas, sármatas y alanos en las culturas locales, que a su vez sufrieron la influencia de otros nómadas, de lengua turca.

Por último, los nómadas han contribuido a construir el imaginario de otros pueblos, en ocasiones por mecanismos inesperados. Ya hemos indicado los relatos de los osetios, de origen sármato-alano, convertidos en patrimonio común de diversos pueblos del Cáucaso. Uno de los grandes héroes de los ciclos épicos persas, Rustem el Sacio, fue recogido de la tradición de los nómadas de la comunidad de pueblos de lengua iraní de Asia central, que tuvieron un papel destacado en las fronteras de los imperios aqueménida, parto y finalmente sasánida. El caso más curioso es el de la presencia de elementos estépicos conservados en la leyenda del rey Arturo: la espada clavada en la piedra, mediante la cual una fuerza sobrenatural designa al rey predestinado, constituye una reminiscencia de un culto escítico-sármata de un dios de la guerra representado por una espada clavada verticalmente; la escena de la muerte de Arturo presenta un paralelo exacto en un relato osetio. Estos elementos de las estepas se deberían a la influencia de tropas auxiliares sármatas del ejército romano, establecidas en la actual Inglaterra desde el 175 para proteger la muralla de Adriano.

El autor

Iaroslav Lebedynsky es profesor del Instituto Nacional de Lenguas y Civilizaciones Orientales de París.

Bibliografía complementaria

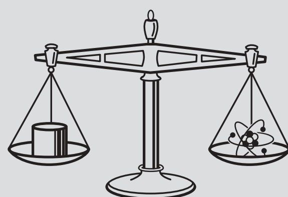
LES HUNS. I Bóna. Editions Errance, 2002.

LES CIMMÉRIENS (2004); LES NOMADES (2003); *LES SARMATES* (2002); LES SCYTHES (2000). I. Lebedynsky. Editions Errance.

LES ALAINS. V. Kouznetsov e I. Lebedynsky. Editions Errance, 2005.

Un nuevo kilogramo

EL OBJETO QUE DEFINE EL KILOGRAMO, LA UNIDAD FUNDAMENTAL DE MASA, SE CONSTRUYÓ HACE MÁS DE UN SIGLO. DEBE SUSTITUIRLO UN PATRÓN MÁS PRECISO Y BASADO EN UNA PROPIEDAD INVARIABLE DE LA NATURALEZA



IAN ROBINSON

Hoy que las técnicas envejecen con celeridad, resulta paradójico que las medidas de la masa (y de los fenómenos relacionados con ella, como la energía) dependan de un artefacto de 117 años de antigüedad guardado en las cámaras acorazadas de un pequeño laboratorio de las afueras de París, la Oficina Internacional de Pesas y Medidas. Según el Sistema Internacional de Unidades (SI), o "sistema métrico", el kilogramo es igual a la masa de este "prototipo internacional de kilogramo" (PIK), un cilindro de una aleación de platino e iridio, fabricado con gran precisión, de 39 milímetros de altura e igual diámetro.

El SI está administrado por la Conferencia General de Pesas y Medidas y el Comité Internacional de Pesas y Medidas. En los últimos decenios, la Conferencia ha redefinido otras unidades básicas del SI (las establecidas por convención y de las que se deducen las demás) para mejorar su precisión y mantenerlas acordes con el adelanto del conocimiento científico y técnico. Los patrones del metro y el segundo se basan ahora en fenómenos naturales. El metro se relaciona con la velocidad de la luz, mientras que el segundo está fundamentado en la frecuencia de las microondas emitidas por un determinado elemento en la transición entre dos de sus estados energéticos.

Hoy día, el kilogramo es la última unidad del SI que continúa dependiendo de un objeto manufacturado y único. Esa dependencia plantea problemas al aumentar la finura de las técnicas de medición. Por eso, los metrólogos se proponen definir la masa mediante técnicas que dependan sólo de características inmutables de la naturaleza.

Dos planteamientos parecen los más prometedores. Uno se basa en las nociones en que descansa la constante de Avogadro, o número de átomos en 12 gramos de carbono 12; el otro recurre a la constante de Planck, el valor fundamental con que se calcula, por ejemplo, la energía de un fotón a partir de su frecuencia. Como las constantes se miden en unidades del SI (kilogramo incluido), cualquier cambio en la masa real del PIK dará lugar a un desplazamiento en el valor de cualquier constante que se mida, una paradoja para fenómenos que se consideran por lo común inmutables. Sin embargo, en el proceso de redefinir de manera más precisa el kilogramo con independencia del PIK, se elegirá una mejor estimación del valor de la constante, que quedará así "fijada".

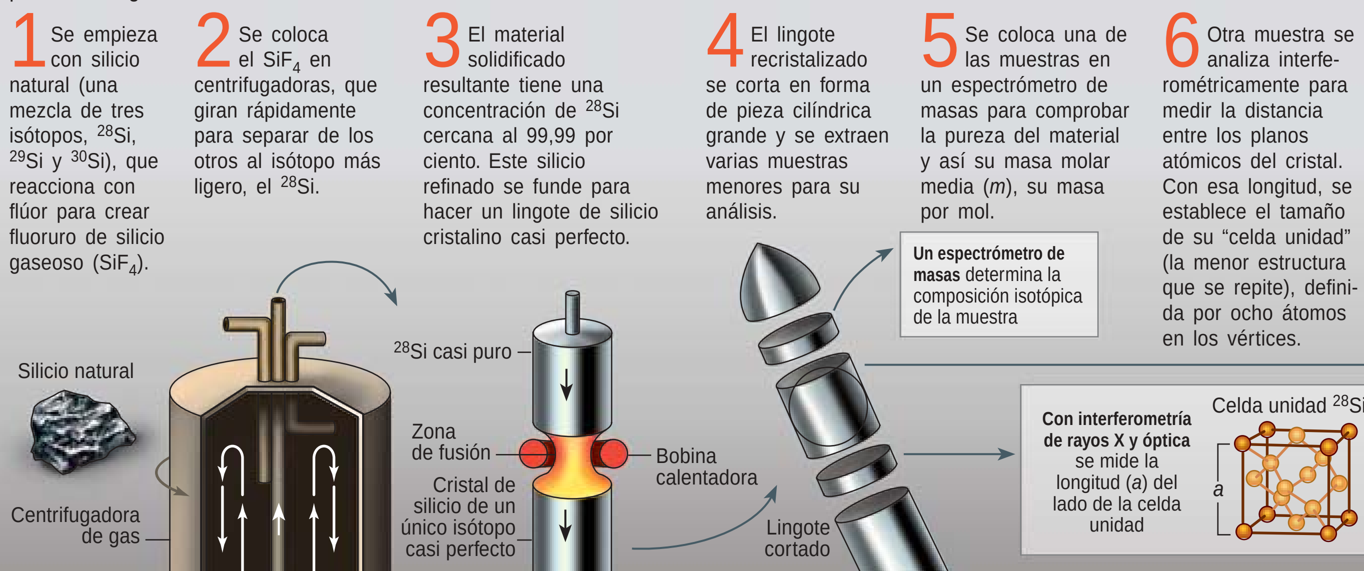
1. ESTE CILINDRO DE METAL (*derecha*), fabricado con gran precisión, que pesa un kilogramo, es el patrón de masa con que se calibran en Italia todos los aparatos de medir masas. Igual que los demás estándares de masa nacionales del mundo, éste se ha calibrado, a su vez, con un patrón idéntico, artificial también, que se guarda en Francia.

RICK JONES (*izquierda*); CORTESIA DEL INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACION METROLOGICA, TURIN, ITALIA (*derecha*)



DE UNA ESFERA DE SILICIO A UN PATRON DE KILOGRAMO

Una manera de redefinir el kilogramo consiste en cuantificar con precisión el número de átomos de una esfera de silicio que pesa un kilogramo.



JEN CHRISTIANSEN

Red de mediciones

La actual definición del kilogramo requiere que todas las mediciones de masa del SI realizadas en el mundo se relacionen con la masa del prototipo internacional de kilogramo. (De ordinario, la "masa" se iguala con el "peso", pero la masa de un objeto se refiere a la cantidad de materia que contiene, mientras que su peso se debe a la atracción gravitatoria entre el objeto y la Tierra.) A fin de establecer dicha relación, los metrólogos sacan el PIK de su santuario cada 40 años aproximadamente, para calibrar las copias del PIK que se envían a las oficinas de pesas y medidas de las 51 naciones signatarias del "Convenio del Metro", el tratado que rige el SI. Una vez ajustadas, las copias se utilizan para calibrar los patrones de masa de los estados miembro, en una cadena larga e ininterrumpida que se propaga hasta las balanzas y demás instrumentos empleados en laboratorios y fábricas del mundo entero.

Tiene sentido económico contar con un estándar de masa estable e inmutable. Pero la experiencia indica que la masa del PIK varía con el tiempo. Observando los cambios relativos de los otros patrones de masa fabricados al mismo tiempo que el PIK y analizando viejas y nuevas mediciones de las constantes fundamentales relacionadas con la masa (de las que se piensa que no cambian perceptiblemente con el tiempo), se ha visto que la masa del PIK ha debido de crecer o disminuir unos 50 microgramos, o más, durante los últimos 100 años. La deriva podría haber sido causada por la contaminación del aire acumulada o por pérdidas por abrasión. Como las unidades básicas del SI sustentan la ciencia y la industria en todo el mundo (vía las cadenas de calibración de estándares nacionales), es esencial asegurarse de que no varían con el tiempo.

Basadas en la naturaleza

La misma inconstancia que aqueja a la definición del kilogramo afectaba también en el pasado al segundo y al metro. Se definía antaño el segundo a partir de la velocidad de rotación de la Tierra. En 1967 se redefinió como "la duración de 9.192.631.770 períodos de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo de cesio 133". Los metrólogos introdujeron este cambio porque el ritmo de rotación de nuestro planeta no es constante, mientras que la longitud de onda de la radiación emitida por el cesio 133 durante una transición específica —es decir, el tictac de un reloj atómico— no se altera con el tiempo y la medición puede reproducirse en cualquier parte del mundo.

Aunque la definición del segundo no se basa en un artefacto, se resiente de su dependencia de una transición particular de un determinado átomo, que por desgracia resulta ser más sensible a los campos electromagnéticos de lo que sería deseable. Quizás haya que cambiar la definición en el futuro para acomodarse a los relojes ópticos, aún más exactos, que se están desarrollando.

La definición del metro resulta más firme. El SI la basaba originalmente en un objeto: era la distancia entre

Resumen/*El kilogramo redefinido*

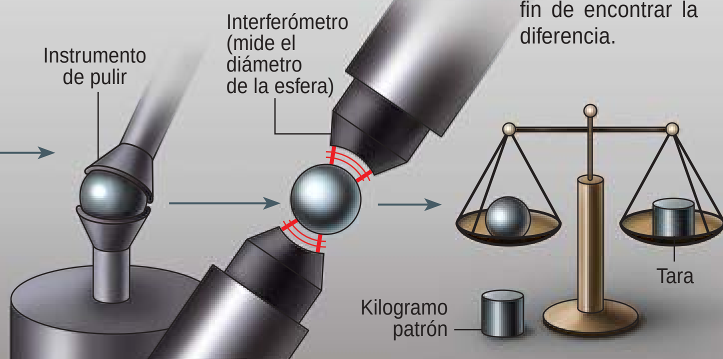
- El kilogramo patrón de la unidad básica de masa ha superado, de lejos, el siglo de existencia: un cilindro de metal del tamaño de una ciruela. El incesante progreso técnico requiere una nueva definición, que se base en una propiedad fundamental de la naturaleza.
- Se están siguiendo dos métodos. Uno calcula el número de átomos de silicio en un kilogramo de silicio puro. El otro recurre a una comparación indirecta de potencias mecánicas y eléctricas para medir el kilogramo a partir de longitudes, tiempos y efectos mecánico-cuánticos.

7 Mientras, se convierte el cilindro de silicio en una esfera casi perfecta.

8 Se calibra el diámetro exacto de la esfera acabada con técnicas interferométricas de alta precisión.

9 En una balanza ultraprecisa se comparan la masa de la esfera y la masa de un kilogramo patrón con una tara, a fin de encontrar la diferencia.

10 La densidad de la esfera (ρ) se calcula a partir de su masa y su diámetro, y el volumen ocupado por un átomo es $a^3/8$. Combinando estos resultados con la masa molar media m del silicio, se espera determinar, por medio de la fórmula $N_a =$ $= 8m/\rho a^3$, el número de átomos en un mol de ^{28}Si —la constante de Avogadro (N_a)— con un error menor que unas dos partes en 100 millones.





ESFERA DE SILICIO

CENTRO AUSTRALIANO PARA OPTICA DE PRECISION CSIRO (*fotografía*)

dos líneas grabadas en una barra muy estable de platino e iridio. En 1983 el metro pasó a ser "la longitud de la trayectoria recorrida por la luz en el vacío durante un intervalo de tiempo de 1/299.792.458 segundo". Esta definición debía también ser resistente, porque fijaba el valor de una constante física clave, la velocidad de la luz, en exactamente 299.792.458 metros por segundo. Así, el progreso en el control y la medición de la frecuencia de la radiación electromagnética (el número de vibraciones sinusoidales por segundo) mejorará la exactitud con que podamos medir el metro, sin que ello requiera ningún cambio en la definición de la unidad.

Recuento atómico

Para redefinir el kilogramo en términos de una constante física, los metrólogos miden el valor de la constante con la mayor exactitud posible, valiéndose de la definición existente de la unidad de masa. El número que se obtiene se incorpora entonces en la nueva definición para lograr una transición suave entre las viejas y las nuevas definiciones. Puede entonces emplearse el método de la medición, junto con el nuevo valor fijado para la constante, a fin de determinar la masa en términos de la nueva definición.

Un planteamiento prometedor relaciona el kilogramo con la masa de un átomo: cuantifica el kilogramo en términos de la masa de cierto número de átomos de un determinado elemento. Esta vía fijaría el valor de la constante de Avogadro, que se define como el número de átomos de un determinado elemento en un mol, unos $6{,}02 \times 10^{23}$ átomos. (Un mol es la cantidad de un elemento que tiene una masa en gramos igual al peso atómico del elemento; un mol de carbono 12 tiene una masa de 12 gramos.)

El problema con esta estrategia, sin embargo, es que requiere que se cuente un número de átomos que forme una cantidad ponderable de material, a fin de poderla comparar con una masa de un kilogramo. Puesto que varios efectos físicos limitan la exactitud y la resolución de las balanzas a alrededor de 100 nanogramos, se necesitaría un mínimo de cinco gramos de material para acercarse a la exactitud deseada de unas dos partes en 100 millones. Por desgracia, no se puede contar átomos con celeridad suficiente; aun cuando se pudiera construir un contador capaz de sumar un billón de átomos por segundo, se tardaría cerca de siete milenios en contar suficientes átomos de carbono 12.

Se podría, sin embargo, determinar el número de átomos en un cristal perfecto dividiendo el volumen del cristal por el volumen que ocupa un solo átomo. Si se pesa luego el cristal y se conoce la masa, con respecto al carbono 12, de la especie atómica que lo compone, podremos calcular la constante de Avogadro, con lo que se tendrá una ruta hacia la redefinición del kilogramo.

Este método más práctico, que ahora se está llevando a cabo, empieza por medir el volumen ocupado por un átomo mediante la determinación del espaciamiento regular de los átomos en el seno de un cristal casi perfecto, con un conocido número de átomos por celda unidad y de peso también conocido, cercano a un kilogramo. Establecidas las dimensiones del cristal, se halla el volumen total; a partir de ello puede calcularse la masa de un átomo de la muestra. De los resultados se deduce la constante de Avogadro, que se calcula dividiendo la masa molar de un elemento por la masa de un átomo.

Aunque este plan no ofrece dificultades conceptuales, cuesta ejecutarlo porque requiere un grado extremo de precisión. Es un proyecto tan caro y complejo, que ningún laboratorio puede acometerlo en solitario. De ahí que la carga se la reparta un consorcio de laboratorios de Australia, Bélgica, Alemania, Italia, Japón, el Reino Unido y los EE.UU., integrados en la Coordinación Internacional Avogadro.

Para que el procedimiento resulte operativo, el cristal debe tener una estructura casi perfecta, con pocos vacíos o impurezas. Se decidió que fuera de silicio porque la industria de los semiconductores lo ha estudiado a fondo y ha creado métodos que generan cristales grandes y perfectos. Una vez que se hayan completado las mediciones del cristal, se relacionarán los resultados con la definición del mol de carbono 12, gracias a la suma precisión, obtenida con el espectrómetro de masas, con que se conoce la masa atómica del silicio.

Se extrajeron primero varias muestras de un cristal en bruto. Una de ellas se pulió para formar una esfera de un kilogramo. Sería el objeto de las mediciones. Se escogió esa forma redonda porque una bola no tiene esquinas que puedan arrancarse y porque ya se sabía cómo hacer con silicio una esfera casi perfecta. Los técnicos australianos fabricaron una esfera de 93,6 milímetros de diámetro que se aparta de la ideal en no más de 50 nanómetros. Si cada átomo de silicio fuera del tamaño de una canica grande (unos 20 milímetros de diámetro), la esfera tendría más o menos el tamaño de la Tierra y la distancia entre la cota más alta y la más baja de su superficie sería de unos siete metros (una distancia de unas 350 canicas).

Para encontrar el volumen de la esfera de silicio, hubo que determinar su diámetro medio con una precisión del orden del diámetro del átomo. Primero se reflejó la luz de un láser de una frecuencia conocida sobre caras opuestas de la esfera, en el vacío; se calibró la diferencia de las trayectorias ópticas (en longitudes de onda) con la esfera y sin ella. Este paso permitió hallar su diámetro en metros, ya que la longitud de onda de la luz es igual a la velocidad de la luz (fija) dividida por la frecuencia conocida del láser. El volumen se calculó a partir del diámetro, más algunas pequeñas correcciones necesarias por la forma ligeramente imperfecta del cristal y las propiedades ópticas de las superficies.

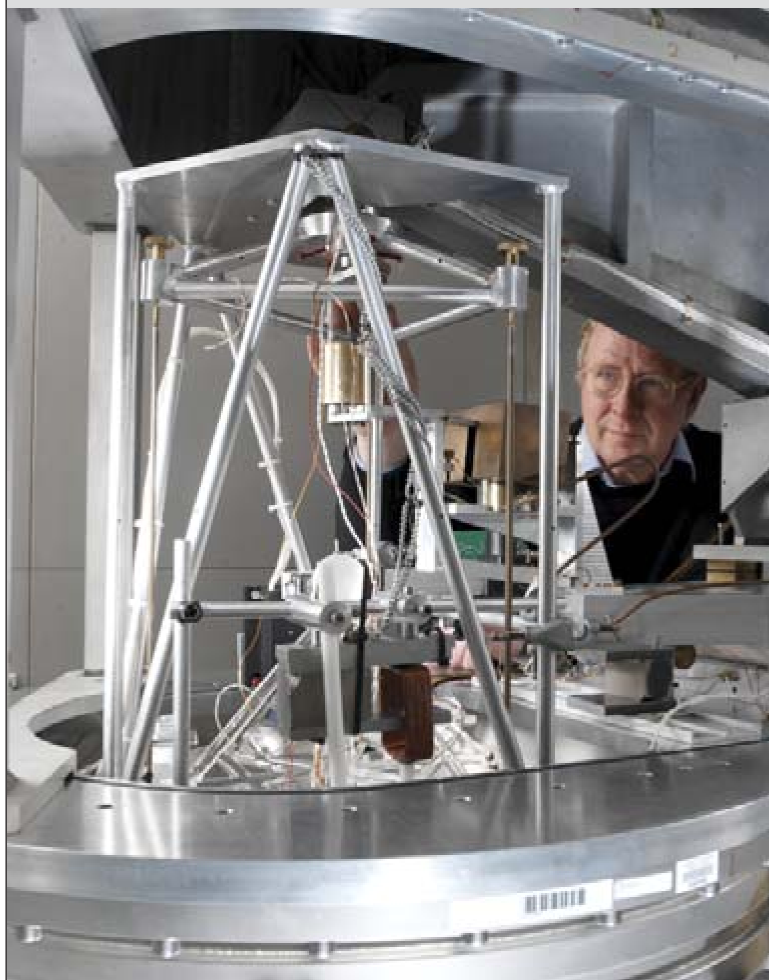
El volumen ocupado por un átomo se obtuvo combinando la interferometría óptica y de rayos X a fin de encontrar la distancia entre los planos atómicos en una muestra extraída del cristal en bruto. Se grabaron varias ranuras en la muestra, de suerte tal que una parte del cristal se moviera de forma reproducible con respecto al resto, manteniendo la alineación angular de los planos atómicos. Se colocó la muestra en el vacío y se la iluminó con rayos X de una longitud de onda lo bastante pequeña para reflejarse en los planos atómicos del cristal. La intensidad de esta reflexión, que varía según la posición relativa de los planos atómicos en las partes móviles y estacionarias del cristal, sirvió para contar el número de separaciones de los planos que la parte reposicionada del cristal se había desplazado. Al mismo tiempo, se midió la distancia de la traslación con un interferómetro láser que empleaba luz de una frecuencia conocida. Esta técnica determinaba, en metros, la separación entre planos. Al saber la estructura cristalina, se halló el volumen ocupado por un átomo.

La masa de la esfera cristalina se comprobó mediante una "pesada de sustitución", con una balanza ordinaria y una tara, cuya masa debe ser estable, aunque no necesariamente conocida. Se colocó la esfera en una balanza y se la comparó con una tara de un kilogramo situada en el otro brazo de la balanza. Se substituyó entonces la esfera con una masa conocida conforme al patrón de masa PIK y se repitió el proceso de pesada. Puesto que la sustitución se realizaba de forma tal que esa suplantación no repercutiera en la balanza, la diferencia entre las dos pesadas daba la diferencia en masa entre la esfera y el patrón de masa, con lo que se halló la masa de la esfera. Este método eliminaba los errores que derivan, entre otras razones, de la desigualdad de las longitudes de los brazos de la balanza.

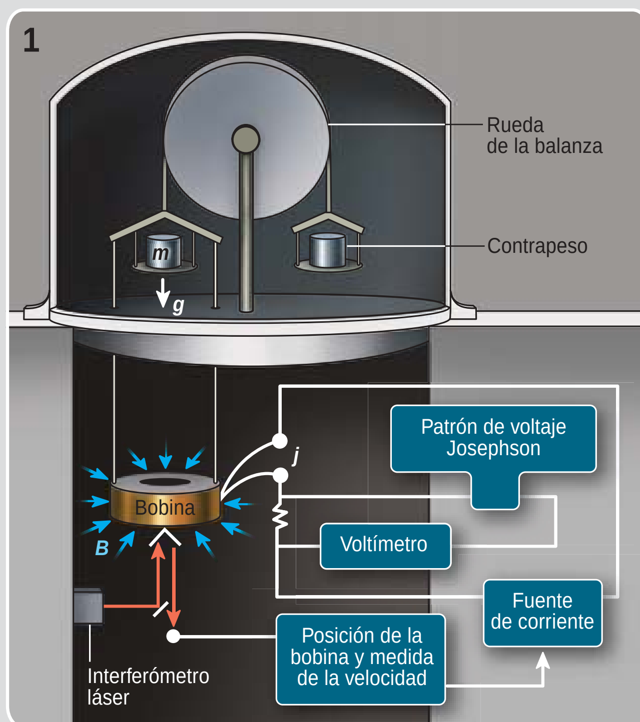
Se analizaron también otras muestras del material de silicio para establecer la abundancia relativa de los varios isótopos, a fin de explicar sus distintas contribuciones a

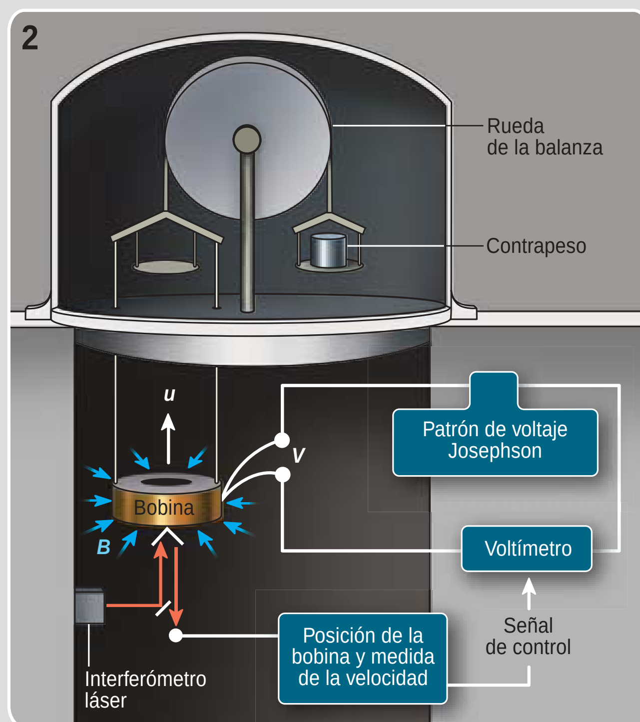
DE LA BALANZA DE WATT AL KILOGRAMO PATRON

Otro método de redefinir el kilogramo cuantifica una masa en términos de su energía equivalente. Se basa en la fuerza producida cuando una corriente atraviesa un cable en un campo magnético; se la ajusta de modo que equilibre exactamente el peso de una masa. El procedimiento hace uso de una refinada "balanza de watt" (*abajo*). En un lado de la balanza hay un simple contrapeso (*diagramas*). En el otro, un kilogramo patrón de masa *m* cuelga sobre una bobina de cables, colocada en posición horizontal. El peso del patrón es el producto de *m* por la aceleración causada por la gravedad, *g*.



CORTESIA DEL LABORATORIO NACIONAL DE FISICA, U.K., © CROWN 2005





***1* FASE DE PESADA**
En el primer paso, la bobina se sumerge en un campo magnético radial y una corriente eléctrica pasa a su través. Una fuerza electromagnética inducida actúa entonces sobre la bobina; está orientada en sentido contrario a la gravedad. Si esta fuerza electromagnética equilibra exactamente el peso del patrón, se calculará la masa *m* de éste a tenor de la ecuación:

$$m = BLi/g$$

donde *B* es la intensidad del campo magnético, *L* es la longitud del cable de la bobina, e *i* es la corriente eléctrica. Por desgracia, en la práctica resulta casi imposible calibrar directamente el producto *BL* con suficiente exactitud.

***2* FASE DE MOVIMIENTO**
Ahora bien, si la bobina se mueve a velocidad constante *u* perpendicularmente al campo magnético, generará un voltaje *V* igual a *BLu* (viene a ser un generador eléctrico). Ambos, velocidad y voltaje, pueden medirse con fina precisión. Y se puede entonces eliminar el espinoso producto *BL* de la ecuación anterior:

$$m = Vi/gu$$

El resultado final iguala la potencia mecánica y la eléctrica. La potencia mecánica medida equivale a la que correspondiente a un movimiento vertical de la masa con velocidad *u*, mientras que la potencia eléctrica equivale a la disipada en una resistencia ideal sometida a un voltaje *V* y atravesada por una corriente *i*. Sin embargo, como las dos fases de medición están separadas en el tiempo, la potencia no es real (de ahí que se la llame "potencia virtual"). Tales mediciones "virtuales" permiten ignorar la potencia real que se genera o se disipa en ambas fases del experimento; sólo así pueden lograrse las bajas incertidumbres que se requieren.

Durante el experimento, varios sistemas de medición de alta precisión controlan la balanza de watt. Un interferómetro láser mide el movimiento de la bobina; los tiempos se determinan con una señal de referencia ultraprecisa. Un sensible gravímetro (*que no se muestra*) controla la intensidad local del campo gravitatorio de la Tierra. Otros dispositivos, basados en el efecto Josephson y en el efecto Hall cuántico, miden el voltaje y la corriente con precisión extraordinaria. Se puede entonces relacionar la masa de un kilogramo con la constante de Planck de la teoría cuántica, el metro y el segundo: y ello con una precisión altísima.

JEN CHRISTIANSEN

la masa total de la esfera. Para realizar la tarea, hubo que determinar la proporción de los tres isótopos —silicio 28, silicio 29 y silicio 30— presentes en el cristal de silicio natural. Se recurrió a la espectroscopía de masas, que separa los isótopos cargados según sus distintos cocientes entre la carga y la masa.

La Coordinación Internacional Avogadro se encuentra a punto de terminar el trabajo con las esferas de silicio natural. Ha determinado ya el número de átomos en una esfera de un kilogramo con una precisión cercana a tres partes en 10 millones. Pero no basta tamaña precisión. Para alcanzar niveles superiores, el grupo está fabricando una esfera compuesta casi por un isótopo, el silicio 28. La fabricación de un tal objeto costará entre 1,25 y 2,5 millones de dólares. Las centrifugadoras de gas rusas, que antes se empleaban para refinar el uranio hasta el grado que se requiere en el armamento, están purificando el material para la nueva esfera. El consorcio aspira a una incertidumbre en el resultado final de unas dos partes en 100 millones antes del año 2010.

Pesar la energía equivalente

La otra vía hacia la redefinición del kilogramo se basa en medir la masa por su energía equivalente, conforme al principio que Albert Einstein estableció con su famosa ecuación $E = mc^2$, que relaciona la masa y la energía en su nivel más fundamental. La masa se definiría así por la cantidad de energía en que podría convertirse.

Al igual que en el recuento de los átomos, las técnicas que hay que utilizar para ello presentan graves inconvenientes. Así, la conversión directa de masa en energía desprende energía atómica en demasía. Por suerte, son factibles métodos más llevaderos, que comparan la energía o la potencia eléctrica y mecánica ordinarias. Pero antes deben superarse los problemas asociados a las pérdidas de energía.

Para hacerse una idea de las dificultades de este tipo de planteamiento, imaginemos que se levanta un objeto de masa *m* con un motor eléctrico, que actuará, pues, contra la gravedad. En una situación ideal, toda la energía suministrada al motor aumentaría la energía potencial del objeto. La masa podría entonces calcularse a partir de la energía eléctrica *E* suministrada al motor, la distancia vertical *h* recorrida por el objeto y la aceleración de la gravedad *g* por medio de la fórmula $m = E/gh$. (La aceleración causada por la gravedad debería calibrarse con mucha exactitud por medio de gravímetros de precisión.)

En el mundo real, sin embargo, las pérdidas de energía en el motor y en otras partes del sistema harían casi imposible una medición precisa. Aunque se han intentado experimentos similares con masas superconductoras levitantes, cuesta alcanzar precisiones superiores a una parte en un millón.

Hace unos 30 años, Bryan Kibble, del Laboratorio Nacional de Física del Reino Unido, ideó la balanza de watt, que evita los problemas de las pérdidas de energía midiendo la "potencia virtual". Ese ingenioso procedimiento, en dos etapas, sortea las inevitables pérdidas. Relaciona el kilogramo estándar, el metro y el segundo con realizaciones prácticas de elevada precisión de la resistencia eléctrica (en ohm) y del potencial eléctrico (en volt), basadas en dos fenómenos mecánico-cuánticos, el efecto Josephson y el efecto Hall cuántico. De este modo se mide el valor de la constante de Planck con mucha precisión.

En la balanza de watt, para pesar un objeto de masa *m* se lo suspende del brazo de una balanza común, de la que pende también, inmersa en un fuerte campo magnético *B*, una bobina de cable de una longitud total *L*. Se hace pasar una corriente *i* a través de la bobina para generar una fuerza *Bli*, que se ajusta para equilibrar exactamente el peso *mg* de la masa (es decir, $mg = Bli$). Entonces se quitan la masa y la corriente. Y, en una segunda parte del experimento, se mueve la bobina a través del campo con una velocidad determinada *u* mientras se controla el voltaje inducido *V* ($V = BLu$). Esta segunda fase nos da el valor del producto *BL*, difícil de determinar de cualquier otra manera. Si el imán y la bobina son suficientemente estables, de modo que el producto *BL* sea igual en ambas partes del procedimiento, los resultados se podrán combinar para dar $mgu = Vi$, que establece la igualdad de la potencia mecánica (fuerza por velocidad, *mg* por *u*) y la potencia eléctrica (voltaje *V* por corriente *i*). Separando las mediciones de *V* y de *i*, así como las de *mg* y *u*, se obtiene un resultado que no es sensible a la pérdida real de energía en ninguna parte del experimento (es decir, el calor disipado en la bobina durante la pesada o las pérdidas por fricción durante el movimiento), de manera que se podrá decir que el aparato ha medido la potencia "virtual".

Se determina la corriente eléctrica en la fase de pesada del método de la balanza de watt haciéndola pasar a través de una resistencia. Esta resistencia se calibra gracias el efecto Hall cuántico, que permite describirla en términos mecánico-cuánticos. El voltaje a través de la resistencia y el voltaje de la bobina se miden cuánticamente por medio del efecto Josephson. Este último resultado permite expresar la potencia eléctrica a partir de la constante de Planck y de la frecuencia. Como los otros términos de la ecuación dependen solamente del tiempo y de la longitud, cabe entonces cuantificar la masa *m* a partir de la constante de Planck, así como del

LOS EFECTOS CUANTICOS CONECTAN CON LA FISICA CLASICA

Aunque los principios de la balanza de watt le resultarían familiares a un físico del siglo XIX, su capacidad para medir la masa en términos de constantes fundamentales se apoya en dos efectos cuánticos descubiertos sólo en los últimos 45 años: el efecto Josephson y el efecto Hall cuántico. Ambos fenómenos ocurren a la temperatura del helio líquido (4,2 kelvin) o menor.

EFECTO JOSEPHSON

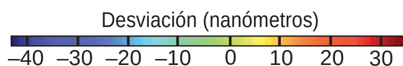
Una unión Josephson consta de dos superconductores separados por un pequeño hiato aislante que los pares de electrones pueden atravesar gracias a un fenómeno cuántico, el efecto túnel. Si una tal unión se ilumina con microondas, los pares de electrones del superconductor absorberán fotones de las microondas y saltarán sobre la separación. Bajo estas condiciones, el voltaje a través de la separación será un múltiplo pequeño de *hf/2e*, donde *h* es la constante de Planck, *f* es la frecuencia de la radiación de microondas y *e* es la carga elemental. Se cree que esta relación es exacta. Proporciona un patrón de voltaje de una precisión sin paralelo.

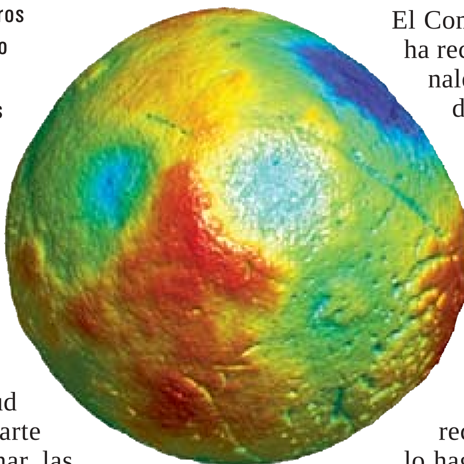
EFECTO HALL CUANTICO

El efecto Hall ordinario ocurre en todos los conductores. Tiene lugar cuando una corriente eléctrica atraviesa un material inmerso en un campo magnético. El campo magnético genera una fuerza sobre los portadores de carga en una dirección perpendicular a la del campo y a la de la corriente. Estas condiciones hacen que la carga eléctrica se acumule en los lados del dispositivo, produciendo a la vez un voltaje y un correspondiente campo eléctrico, que se opone a la fuerza magnética sobre los portadores. Este voltaje es proporcional a la corriente aplicada y al campo magnético; en consecuencia, el efecto puede percibirse como una resistencia al flujo eléctrico (la resistencia Hall), proporcional al campo magnético.

En semiconductores especialmente fabricados y sometidos a bajas temperaturas (en el intervalo entre 1,2 y 0,03 kelvin) e intensos campos magnéticos, podemos observar la versión mecánico-cuántica del efecto Hall. En tales condiciones, y en pequeños intervalos de la intensidad del campo magnético, la resistencia Hall cuántica se vuelve independiente, a la vez, del campo magnético y del material semiconductor: es igual a h/ne^2, donde *n* es un entero pequeño. Esta ecuación proporciona un patrón basado en la mecánica cuántica para medir la resistencia eléctrica.

2. LA ESFERA DE SILICIO, de 100 milímetros de diámetro, se midió con un interferómetro de calibración de óptica de rayos X. Los colores de esta imagen digital muestran las desviaciones de la esfericidad.





metro y del segundo, que se basan en constantes de la naturaleza.

Se trata de un método bastante directo. Mas, para alcanzar la exactitud deseada, cifrada en torno a una parte en 100 millones, hay que determinar las cantidades que contribuyen con una exactitud en el límite de muchas de las mejores técnicas disponibles. Además de medir *g* con mucha precisión, han de realizarse todos los procedimientos en el vacío para eliminar los efectos del empuje del aire, durante el proceso de pesada, y del índice de refracción del aire, durante la medida de la velocidad (con un interferómetro láser). La fuerza de la bobina apuntará con exactitud en la dirección vertical y se acometerán en el aparato alineaciones angulares y lineales con una precisión, por lo menos, de 50 microrradianes y de 10 micras, respectivamente. Finalmente, el campo magnético tiene que permanecer invariable entre los dos modos de la balanza de watt, condición que requiere que la temperatura del imán permanente varíe lenta y suavemente.

Tres laboratorios han desarrollado balanzas de watt: la Oficina Federal Suiza de Metrología, el Instituto Nacional de Patrones y Tecnología de EE.UU. y el Laboratorio Nacional de Física británico. Además, la Oficina Nacional Francesa de Metrología está montando un equipo prototipo y el del Instituto Internacional de Patrones y Tecnología está diseñando un aparato. A la postre, se dispondrá de cinco instrumentos independientes, con algunas diferencias en su diseño, de manera que el grado de concordancia de sus resultados indicará hasta qué punto se han identificado y eliminado los errores sistemáticos en cada caso. La meta a largo plazo de estos grupos es medir la constante de Planck con una precisión de, aproximadamente, una parte por 100 millones, con la posibilidad de acercarse a cinco partes en mil millones.

El futuro del kilogramo

Los últimos resultados sobre la constante de Avogadro y los obtenidos por el Laboratorio Nacional de Física y el Instituto Nacional de Patrones y Tecnología sobre la balanza de watt difieren en más de una parte por millón. Hay que resolver esta discrepancia antes de poder redefinir el kilogramo.

La redefinición en términos de la constante de Avogadro o de la constante de Planck tendrá amplios efectos, al reducir las incertidumbres asociadas a esas constantes. Además, si la constante de Planck y la carga eléctrica elemental se fijan (combinando, por ejemplo, mediciones de la balanza de watt y de condensadores), muchas otras cantidades quedarían también fijadas.

El Comité Internacional de Pesas y Medidas ha recomendado que los laboratorios nacionales de medidas continúen sus esfuerzos dirigidos a medir las constantes fundamentales en que se apoya la redefinición. Se espera que estos pasos conduzcan a nuevos patrones, no sólo para el kilogramo, sino también para el ampère, el kelvin y el mol, hacia el año 2011.

Una vez concluida la redefinición, algunas naciones construirán o mantendrán el equipo necesario para contar con una realización directa de la definición. Aquellas que no lo hagan, tendrán sus estándares calibrados con un valor consensuado para el kilogramo, que se habrá deducido del trabajo de laboratorio. En todo caso, debería desaparecer el miedo de dañar o de contaminar el patrón de referencia maestro, ya que se podrán realizar, si es necesario, comparaciones entre los estándares nacionales y un cierto patrón basado en la nueva definición. La nueva definición permitirá que las autoridades vayan ajustando la escala de masas mundial en minúsculos pasos, tan a menudo como sea necesario para mantenerla libre de variaciones y con una perfecta ligazón al mejor valor, el último consensuado e independientemente confirmado, de la unidad de masa del SI. Un sistema así será robusto y estable, y favorecerá que el progreso científico y técnico no remita.

El autor

Ian Robinson, que se licenció en la Universidad de Oxford y doctoró en la de Londres, pertenece al Laboratorio Nacional de Física del Reino Unido. Ha participado en la elaboración de tres generaciones de la balanza de watt del Laboratorio y preside el grupo de trabajo del Comité Consultivo de Electricidad y Magnetismo sobre métodos eléctricos para el control de la estabilidad del kilogramo.

Bibliografía complementaria

GRAVIMETRY. Wolfgang Torge. Walter de Gruyter, 1989.

COMPREHENSIVE MASS METROLOGY. Dirigido por M. Kochsiek y M. Gläser. Wiley-VCH, 2000.

HISTORY AND PROGRESS IN THE ACCURATE DETERMINATION OF THE AVOGADRO CONSTANT. P. Becker en *Reports on Progress in Physics*, vol. 64, n.º 12, págs. 1945-2008; diciembre 2001.

JOSEPHSON VOLTAGE STANDARDS. J. Kohlmann, R. Behr y T. Funck en *Measurement Science and Technology*, vol. 14, n.º 8, págs. 1216-1228; agosto 2003.

THE QUANTUM HALL EFFECT AS AN ELECTRICAL RESISTANCE STANDARD. B. Jeckelmann y B. Jeanneret en *Measurement Science and Technology*, vol. 14, n.º 8, págs. 1229-1236; agosto 2003.

REPLACING THE KILOGRAM. B. P. Kibble y I. A. Robinson en *Measurement Science and Technology*, vol. 14, n.º 8, págs. 1243-1248; agosto 2003.

TRACING PLANCK'S CONSTANT TO THE KILOGRAM BY ELECTROMECHANICAL METHODS. A. Eichenberger et al. en *Metrologia*, vol. 40, n.º 6, págs. 356-365; diciembre 2003.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTANDARES Y TECNOLOGIA

La gracilización



del esqueleto humano

El vigor que pueden adquirir nuestros esbeltos huesos nos ilustra sobre el pasado y el presente de la vida humana

Christopher B. Ruff

EL ESQUELETO HUMANO es, a menudo, tenido por símbolo de la muerte. Y así es, en cierto sentido. El hueso resiste la descomposición mejor que la carne; tiene, pues, mayor probabilidad de conservarse tras la muerte.

Pero el tejido óseo es un tejido vivo. El esqueleto ofrece una dinamicidad notable a lo largo de la vida, incluso en adultos. Responde a necesidades metabólicas y a solicitaciones mecánicas. Cuando los músculos se hacen más fuertes, los huesos subyacentes se adaptan en consecuencia: su forma física se modifica para soportar fuerzas mayores. De manera análoga, la atrofia muscular conlleva huesos más débiles. En consecuencia, los huesos compendian la historia de nuestra vida mucho después que nos hayamos ido.

Dado que la mayor parte del registro arqueológico y paleontológico consiste en huesos, los restos esqueléticos siguen constituyendo la base de casi todo cuanto sabemos sobre antepasados humanos y sobre nuestra evolución. La biografía de los pueblos antiguos está escrita en los huesos que éstos han dejado en pos. Este artículo presenta los resultados de un trabajo experimental que conecta la forma geométrica de un hueso con determinadas pautas de comportamiento, y a la inversa.

Una de las conclusiones a las que hemos llegado es que el esqueleto humano ha ido cambiando en el transcurso de los dos últimos millones de años. Se ha hecho menos robusto o, si se quiere, más grácil. La explicación que damos para este fenómeno aporta una nueva interpretación del problema de la osteoporosis y confirma que nuestros huesos conservan su antigua capacidad de desarrollarse vigorosos.

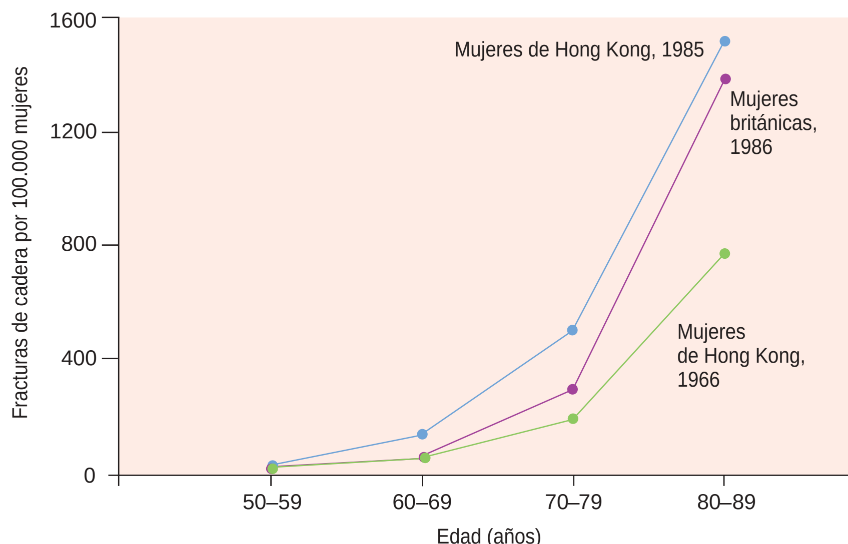
1. LOS HUESOS DE LOS HUMANOS anatómicamente modernos son, en promedio, más esbeltos y menos vigorosos que los de nuestros antepasados. Aunque esa tendencia hacia la gracilización esquelética viene progresando desde hace más de un millón de años, el ritmo al que se debilita el esqueleto se ha acelerado durante los últimos milenios. Sin embargo, los individuos que realizan un ejercicio físico intenso desarrollan huesos más rígidos; la robustez de su esqueleto se aproxima a la de nuestros ancestros. Esta figura se ha generado por ordenador, a partir de radiografías de huesos.

PHOTO RESEARCHERS, INC./*American Scientist*

Palos, piedras y aceras

El esqueleto de los vertebrados tiene que ser a la vez rígido y recio, pero los animales deben buscar un equilibrio entre tales requisitos y la inversión en producción, mantenimiento y desenvolvimiento de un esqueleto pesado. Ello significa que el tamaño esquelético tiende a ajustarse a los requerimientos mecánicos. La posesión de huesos que por exceso o por defecto se aparten de sus dimensiones idóneas resulta desventajosa.

En ingeniería se aplica una noción similar cuando se ha de construir una estructura para una necesidad determinada. El *coeficiente de seguridad* corresponde a la razón entre la capacidad real para soportar esfuerzos y el esfuerzo máximo exigido en el caso más desfavorable. Los ingenie-



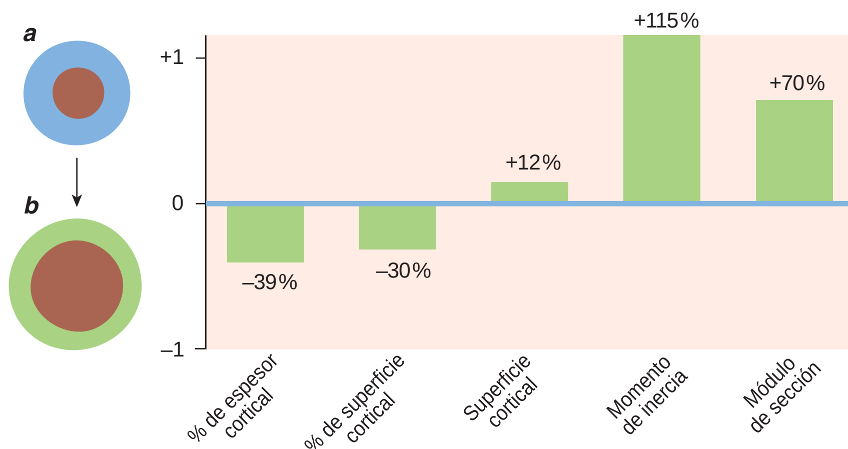
2. LA FRECUENCIA DE FRACTURAS DE CADERA en las mujeres de Hong Kong ha aumentado de forma impresionante entre 1966 y 1985, un período de acelerada industrialización. La incidencia de tales fracturas es ahora igual o mayor que la observada en algunas poblaciones europeas de alto riesgo. También las fracturas de cadera en los hombres de Hong Kong presentan una tendencia similar. El descenso en la actividad física, sumado a una ingesta de calcio tradicionalmente baja, explica, probablemente, el riesgo elevado.

ros biomecánicos, como R. Neill Alexander, de la Universidad de Leeds, han estimado que los coeficientes de seguridad para los huesos de las extremidades de los vertebrados oscilan, por lo general, entre dos y cuatro. De hecho, la fractura de extremidades es bastante rara. A partir de datos correspondientes a especies diversas, se ha estimado que cada hueso tiene una probabilidad de entre el uno y el tres por ciento de sufrir una fractura a lo largo de la vida del animal.

Existe, sin embargo, una patología que conduce a tasas mucho más elevadas de fallos óseos: la osteoporosis. Esta enfermedad, en la que el hueso se torna poroso y quebradizo, prevalece sobre todo entre mujeres de edad avanzada. En Estados Unidos, se estima que el riesgo de sufrir una fractura osteoporótica de cadera a lo largo de la vida es del 17 por ciento y del 6 por ciento, respectivamente, para mujeres y hombres blancos. La mayoría de estas fracturas se producen en adultos de más de 50 años. Son consecuencia de traumatismos mínimos o moderados; por lo general, caídas desde una altura menor o igual que la estatura del sujeto. También son frecuentes en este grupo de edad las fracturas de vértebras o de huesos de las muñecas.

Pero el riesgo de fracturas entre los mayores, aunque elevado, no es uniforme. Los noreuropeos y las personas de ascendencia nórdica de América del Norte, Australia, Nueva Zelanda y Sudáfrica presentan tasas superiores a las de los africanos, los afroamericanos y algunos grupos asiáticos o del Pacífico. Las tasas de fracturas entre las poblaciones europeas de riesgo elevado crecieron todavía más en la segunda mitad del siglo XX. Con todo, resultó un incremento moderado frente a las crestas estadísticas registradas en los residentes de Hong Kong, Singapur y otras poblaciones del sudeste asiático en un proceso de urbanización acelerado. En estas áreas, la incidencia de fracturas de cadera, que era escasa en los años sesenta, dio paso a tasas similares a las europeas 20 años después, en el decenio de los ochenta.

Los ancianos padecen mayor número de fracturas porque la masa y la resistencia del tejido óseo merman con la edad. Por varias razones, igual que varios son también los motivos de que unas poblaciones sean más vulnerables que otras. A imitación de otras peculiaridades complejas, los cambios óseos asociados a la edad son fruto de las interacciones entre factores genéticos y ambientales. Las variaciones en la resistencia de los huesos se han asociado con los cambios en la actividad física, la dosis de calcio y de vitamina D en



3. EL ESPESOR DE LA CORTEZA EXTERNA densa no constituye el mejor índice de la resistencia ósea. Algunos médicos diagnostican osteoporosis cuando la corteza externa se adelgaza, pero tal inferencia puede ser incorrecta si tal adelgazamiento va acompañado de un aumento en el diámetro del hueso, cambio que corre parejo al envejecimiento. En este gráfico se comparan dos secciones transversales de un hueso largo: la basal (*a*) y otra con diámetro aumentado (*b*). En comparación con la corteza de *a* (*azul*), la corteza de *b* (*verde*) supone una fracción menor de la sección transversal (expresada en tanto por ciento de espesor cortical o en porcentaje de área cortical). Sin embargo, el hueso de sección transversal acrecentada (*b*) sería más rígido (mayor momento de inercia) y recio (mayor módulo de sección).

STEPHANIE FREESE, ADAPTADO DE "HIP FRACTURE IN HONG KONG AND BRITAIN"; E. M. LAU, C. COOPER, C. WICKHAM, S. DONNAN Y D. J. BARKER EN *International Journal of Epidemiology*, N.º 19, PAGS. 1119-1121; 1990 (*arriba*); STEPHANIE FREESE Y CHRISTOPHER BRODIE (*abajo*)/*American Scientist*

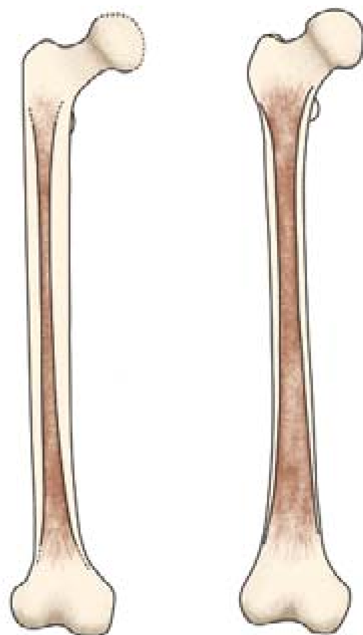
la ingesta, el consumo de alcohol y el grado de adicción al tabaco.

De todas las variables mencionadas, la actividad física es la que tiene mayor probabilidad de explicar la heterogeneidad geográfica de la incidencia de fracturas. En Hong Kong, la urbanización, cada vez más intensa, y la mecanización han causado una reducción en las actividades que exigen el transporte de cargas. Este desplazamiento hacia estilos de vida sedentarios, sumado a dietas pobres en calcio, constituye la explicación más verosímil del aumento reciente en las tasas de fractura. En 1970, John Chalmers, de la Universidad de Edimburgo, y K. C. Ho, de la de Hong Kong, pronosticaron ya esta tendencia.

Desde una perspectiva evolutiva, la elevada incidencia de fracturas óseas a edad avanzada constituye un fenómeno reciente en nuestra especie. Los ancianos de nuestras poblaciones ancestrales sufrían muchas menos fracturas de cadera que nuestros maduros de hoy, descontado, claro está, que su esperanza de vida era menor. Entre los muchos millares de especímenes arqueológicos hallados en las excavaciones, se cuentan con los dedos los casos de fractura de cadera descritos. Y ello a pesar de que esos mismos especímenes sí presentan pérdidas de masa y densidad ósea asociadas a la edad, de frecuencia e importancia similares a los valores actuales. ¿Cómo reconciliar estas observaciones, en apariencia contradictorias? La respuesta se sigue de principios ingenieriles básicos.

Predicción de la resistencia ósea

En ingeniería, cuando se analiza una estructura para determinar la resistencia y la robustez, no se tiene en cuenta sólo su diseño, sino también las propiedades de los materiales de construcción y las dimensiones de la estructura. Este análisis resulta más sencillo en el caso de la biomecánica ósea, porque las propiedades mecánicas del hueso —al menos en el tipo más frecuente en el esqueleto— son casi constantes en el seno de cada especie y entre especies. A tenor de ello, el tejido óseo hubo de adquirirse una sola vez en el curso de la evolución. Desde las ballenas gigantes hasta las pequeñas comadrejas, los esqueletos que han existido a lo largo de la historia de los vertebrados constan, en gran medida, de la misma sustancia.



4. FEMUR de un espécimen de *Homo* de hace 1,9 millones de años (*izquierda*). Aunque exteriormente guarda semejanza con su homólogo moderno (*derecha*), tiene una corteza mucho más gruesa.

STEPHANIE FREESE, ADAPTADO DE "POSTCRANIAL ROBUSTICITY IN HOMO, I: TEMPORAL TRENDS AND MECHANICAL INTERPRETATION"; C. B. UFF, E. TRINKAUS, A. WALKER Y C. S. LARSEN EN *American Journal of Physical Anthropology*, N.º 91, PAGS. 21-53; 1993/*American Scientist*

Por tanto, quienes estudiamos huesos antiguos podemos comparar muestras que han estado sepultadas durante milenios. Las propiedades materiales de esos huesos quizá cambien con el tiempo, haciéndose quebradizos o fosilizándose, pero el tamaño y la forma suelen conservarse bien.

Los huesos no resultan, pues, adecuados para los ensayos. Debe recurrirse a modelos o simulaciones por ordenador para estimar su resistencia original. Podemos representar los huesos largos de las extremidades mediante los modelos que los ingenieros aplican para determinar la resistencia de una viga estructural. En tales simulaciones, las propiedades más importantes son las que describen la forma y las dimensiones de la sección transversal.

El área de la *sección transversal* del hueso determina la rigidez en sentido axial (la resistencia a la deformación ante solicitaciones de compresión o de tracción). Otras propiedades de importancia son el *momento de inercia* (o *segundo momento de área*) y el *módulo de sección*, que miden la resistencia que opone el hueso a la flexión en distintos planos y a la torsión, respectivamente. Estas dos últimas variables dependen de la cantidad de material de la sección transversal, pero dependen todavía más de la distancia al centro de la sección transversal a la que se encuentre distribuido el material. El módulo de sección varía en proporción al cubo de la distancia desde el eje central; el momento de inercia, en proporción a la cuarta potencia de esa distancia.

Los estudios de envejecimiento óseo, incluidos los de muestras arqueológicas, tienden a centrarse en la masa de hueso, el volumen, la densidad o una combinación de tales parámetros, que, no obstante, ofrecen una imagen incompleta de la biomecánica esquelética. En vista de los principios ingenieriles, los modelos animales y las observaciones en humanos, es probable que las propiedades arquitectónicas recién descritas revistan mayor importancia para la determinación de la resistencia global y la probabilidad de fracturas.

De hecho, a falta de una perspectiva ingenieril, ciertas mediciones comunes se prestan a interpretaciones erróneas. Así, en casi todos nosotros, la corteza (la capa externa y densa que compone la diáfisis y la epífisis de los huesos largos) se adelgaza con la edad. Este cambio se expresa a través de una disminución porcentual del espesor cortical. Suele considerarse un indicio de fragilidad creciente. Sin embargo, esta interpretación es válida sólo si se mantiene el diámetro externo del hueso. Si el hueso se ensancha con la edad —fenómeno documentado—, la resistencia y rigidez aumentan a pesar de que la corteza corresponda a un porcentaje menor del diámetro total. Algunos expertos conjeturan que el ensanchamiento de los huesos largos asociado a la edad tiende a compensar la pérdida general de masa ósea, si bien el efecto parece variar de unas poblaciones humanas a otras. Los antropólogos rara vez tienen en cuenta este factor en sus estudios de restos esqueléticos humanos.

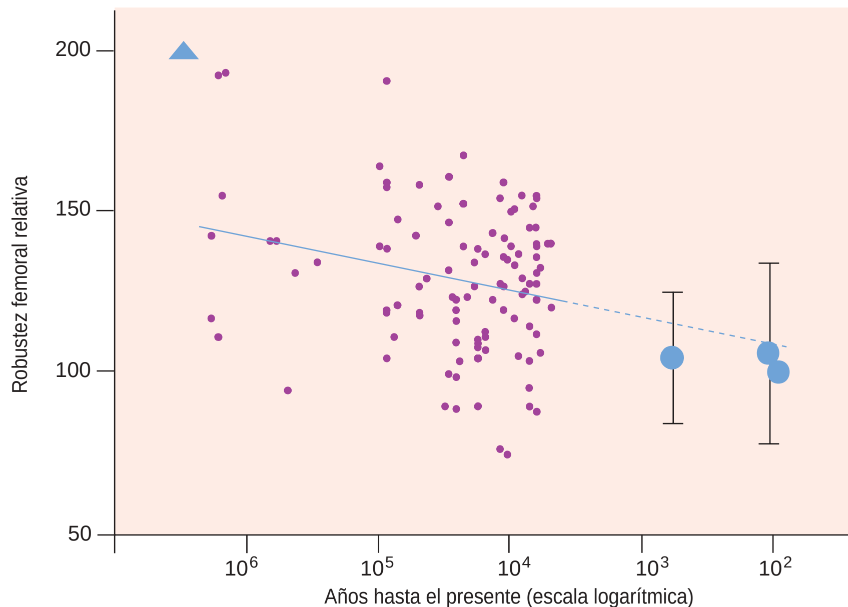
Más cerebro, menos vigor

El análisis biomecánico arroja luz sobre la vida de las poblaciones humanas del pasado y sobre los

cambios esqueléticos que se han ido produciendo a lo largo del tiempo. Conjuntamente con mis colegas Erik Trinkaus, de la Universidad de Washington en St. Louis, y Brigitte Holm, de la Universidad de Massachusetts en Amherst, he investigado los cambios de resistencia ósea relativa entre humanos modernos y sus antepasados de los últimos millones de años. Aludo a la resistencia “relativa” porque resulta crítica para el control de la variación en el tamaño corporal: los cuerpos de mayor tamaño poseen huesos más largos y fuertes, regla particularmente cierta para los huesos que han de soportar pesos. Esta relación se aplica a los adultos de una misma especie homínida y entre especies distintas; también, para un mismo adulto en el curso de su desarrollo.

La longitud de un espécimen óseo, arqueológico o fósil, es fácil de medir. La masa corporal, en cambio, resulta más difícil de calcular. Los métodos que utilizamos para ello se basan en el tamaño de la cabeza del fémur (la bola que encaja en la articulación de la cadera) y en estimaciones de la estatura y envergadura total que tuvo originalmente el individuo (a partir de la longitud de los huesos largos y de la anchura de la pelvis). Evitamos la posibilidad de razonamientos circulares porque la cabeza femoral presenta pautas de crecimiento independientes de la diáfisis, en el que se miden las propiedades biomecánicas.

En un conjunto de experimentos, obtuvimos secciones transversales ópticas de los huesos largos de más de 100 especímenes humanos cuya antigüedad iba desde los 5000 hasta los 1,9 millones de años. Todos eran miembros del género *Homo*, antepasados directos o bien parientes cercanos de los humanos modernos. Los restos procedían de Africa y de Eurasia: los especímenes más antiguos (de más de 600.000 años de edad) eran africanos; europeos, la mayoría de los posteriores. Realizamos algunas mediciones a partir de fotografías de fósiles fracturados; los datos, en su mayoría, se obtuvieron mediante inspecciones minuciosas por rayos X combinadas con moldes de los originales. (Hubiera sido preferible la tomografía computarizada, o TAC, pero los museos donde se conservaban los restos no disponían de tales recursos.) Debido al distinto estado de las muestras, los mejores datos se obtuvieron de la *diáfisis* del fémur. Para tener en cuenta las diferencias de tamaño corporal, normalizamos el módulo de la sección en ese punto, dividiéndolo por el producto de la masa corporal estimada y la longitud femoral.



5. VIGOR MEDIO DE LA OSAMENTA de los humanos y de sus ancestros evolutivos. Ha venido mermando durante los dos o tres últimos millones de años. En este gráfico se ha representado el vigor femoral (módulos seccionales), relativo al tamaño corporal, en función del tiempo. El eje temporal está graduado en escala logarítmica, porque la relación es exponencial. La línea continua azul es la recta de regresión correspondiente a un conjunto de 104 fósiles de individuos atribuidos al género *Homo* (*círculos violeta*); la línea de trazos corresponde a la extrapolación hasta el presente. El triángulo azul representa a Lucy, una australopitécida, cuyo parentesco con el hombre es más remoto (no se ha incluido en la regresión). Los círculos azules corresponden a valores medios de tres poblaciones de humanos anatómicamente modernos: una muestra arqueológica de nativos americanos del sudoeste de EE.UU., que vivieron hace unos 900 años, una muestra de africanos orientales y otra de individuos blancos estadounidenses, de comienzos a mediados del siglo XX. Las barras definen la imprecisión (más/menos dos desviaciones típicas) de los datos para los nativos americanos y los africanos; no se pudo disponer de datos individualizados del tamaño corporal de los blancos estadounidenses.

STEPHANIE FREESE, ADAPTADO DE RUFF, 2005/*American Scientist*

La representación gráfica de la resistencia relativa en función de la edad de la muestra se ajusta a un decrecimiento exponencial, es decir, un declive que se va haciendo progresivamente más pronunciado. (Pese a la dispersión llamativa de los datos, la tendencia exponencial es estadísticamente significativa.) En el intervalo que va desde hace unos 2 millones de años hasta unos 5000 años, los huesos humanos se han debilitado en torno a un 15 por ciento.

Hemos comparado también esos valores con los de restos humanos más recientes, de menos de 1000 años de antigüedad, correspondientes a tres poblaciones de América del Norte y de Africa Oriental. Los huesos de los especímenes eran, en promedio, un 15 por ciento más débiles que los de hace 5000 años; se encuentran por debajo de la extrapolación de la recta de regresión correspondiente al conjunto principal de datos. Ello indica que el vigor relativo de los huesos disminuyó con mayor celeridad durante los 5000 últimos años que a lo largo de los 2 millones de años precedentes.

Industrialización y sedentarización

Los restos son rara vez completos. De ahí que la reconstrucción del tamaño

corporal de fósiles de antepasados humanos de más de 2 millones de años resulte más difícil todavía. Tenemos una excepción en “Lucy”, célebre esqueleto de 3,1 millones de años descubierto en Etiopía, que nos ha llegado lo bastante completo como para determinar, con un grado adecuado de confianza, el tamaño de su cuerpo. A juzgar por nuestros cálculos del vigor femoral relativo de Lucy, sus huesos presentaban una fuerza mayor que los de los especímenes *Homo* primitivos; doblaban la resistencia que caracterizaría a un humano medio de hace cientos de años.

Lucy era un australopitécido, un miembro de un grupo muy primitivo, situado en el linaje que conduce hasta los humanos modernos o en su proximidad. Aunque Lucy y sus parientes utilizaban la locomoción bípeda, se supone que pasaba en las copas de los árboles más tiempo que los *Homo* posteriores. No debió de recorrer largas distancias. Los huesos de los brazos de otros miembros de su grupo parecen ser muy fuertes, reflejo quizá de este comportamiento. (Desdichadamente, para este estudio no pudimos disponer de secciones transversales de los huesos de los brazos de Lucy.) De ser verdadera esta hipótesis, el vigor femoral de Lucy resulta todavía más notable, dado que probablemente caminaba menos que muchos humanos modernos.

Resultados similares se observan entre chimpancés, gorilas y babuinos. En relación con el tamaño corporal, la fortaleza de los huesos de los brazos y piernas de esos primates es mayor que la de los humanos. (La diferencia aumenta todavía más para el brazo que para la pierna, obviamente, pues esos antropoides utilizan en la locomoción los dos pares de extremidades.) No sorprende, pues, que los primates no humanos posean músculos más vigorosos que los humanos en relación con su tamaño. En consecuencia, los resultados sobre el vigor de los huesos resultan coherentes: los músculos más vigorosos generan fuerzas mayores, que aumentan el esfuerzo mecánico de los huesos; estas solicitaciones inducen al hueso a adaptarse con el paso del tiempo, aumentando la rigidez.

De los resultados sobre vigor óseo se desprende que nuestros antepasados primitivos estaban dotados de músculos más poderosos, hipótesis coherente con las grandes escaras de inserción muscular que se observan en numerosos especímenes. (Las observaciones de escaras, sin embargo, distan de ser concluyentes, dado que los huesos de algunos primates modernos no humanos no exhiben tales marcas.) Si los humanos primitivos eran más musculosos que nosotros, se debía, al menos en parte, a su modo de vida más activo y duro. Ello, a su vez, guardaría relación con el uso de utensilios: el desarrollo técnico que ha acompañado a la evolución humana ha actuado de escudo, que aísla el cuerpo humano de su ambiente natural.

No se han encontrado útiles que correspondan al período vital de Lucy. En términos técnicos, es probable que sus congéneres interactuasen con el mundo natural de forma muy parecida a como lo hacen los chimpancés y gorilas modernos. La ausencia de herramientas es pronóstico de una fortaleza ósea relativa notable. Los *Homo* primitivos se servían de útiles líticos elementales; aunque sus huesos no llegan a ser tan fuertes como los de Lucy, presentan una rigidez mayor que la de los humanos modernos. Los huesos de los humanos modernos, débiles en comparación con aquéllos, son una consecuencia inevitable de un estilo de vida sedentario y de la existencia y ubicuidad de todo tipo de útiles que hacen que la fuerza física sea menos importante para la supervivencia. Quizá por la misma razón, el cuerpo humano se haya vuelto, en su conjunto, más pequeño a lo largo de los 50.000 últimos años, a pesar de los aumentos recientes, probablemente vinculados a la mejora de la nutrición y a los avances médicos.

Asimetría bilateral

Numerosos estudios sobre animales demuestran que los huesos se fortalecen con el ejercicio físico. Los fémures de cerdos jóvenes a los que se hizo correr una hora diaria durante un año eran un 24 por ciento más robustos que los de los individuos de control, de vida sedentaria. Tal aumento fue pura consecuencia de modificaciones geométricas —ante todo un engrosamiento de la corteza



6. *AUSTRALOPITHECUS AFARENSIS* fue uno de los primeros homínidos bípedos y, probablemente, un antepasado del género *Homo*. Este espécimen, la famosa “Lucy”, es inusitadamente completo para tratarse de un esqueleto que cuenta 3,1 millones de años; ello permite una estimación precisa del tamaño corporal total (su estatura debió ser de 1,1 metros). Habida cuenta del tamaño de su cuerpo, el fémur de Lucy es más robusto que el de otros antepasados nuestros más modernos, a pesar de que su especie dedicaba menos tiempo a la locomoción bípeda que sus descendientes.

JOHN READER/PHOTO RESEARCHERS, INC./*American Scientist*

ósea— sin efecto sobre las propiedades del material del hueso. Otras investigaciones revelan observaciones similares; avalan así el uso del análisis de la geometría ósea en la estimación de los esfuerzos mecánicos del pasado.

La extremidad superior humana ofrece un "experimento natural" de este tipo, pues solemos valernos preferentemente de una de las dos manos en casi todas las tareas. Ello permite comparar las adaptaciones óseas en los brazos dominante y no dominante de personas con grado de actividad distinto.

A diferencia de la mayoría de los animales, los humanos no utilizamos los brazos para la locomoción, reflejo de la asimetría de uso y estructura. En efecto, las extremidades superiores de los humanos muestran una asimetría lateral (izquierda/derecha) mayor que las de cualquier otro mamífero. Diestros y zurdos poseen magnitudes parecidas —aunque de sentido opuesto— de asimetría bilateral en la robustez del segundo metacarpo (uno de los huesos de la mano). Los diestros la tienen en la mano derecha; los zurdos, en la izquierda. Tal comparación ofrece, entre otras ventajas, su independencia del tamaño corporal, la nutrición, las influencias hormonales y otros factores no conductuales que afectan por igual a ambos lados.



7. LOS CHIMPANCES ADULTOS en estado natural pesan entre 30 y 60 kilos. Sin embargo, se estima que tienen, por término medio, el doble de fuerza que los humanos. La musculatura responsable de tal vigor resalta en esta hembra, llamada Cinder, del zoológico de Saint Louis, que ha perdido el pelaje corporal por alopecia. Añádase que Cinder es pequeña en comparación con otros individuos de su especie. Los huesos de los chimpancés son, lo mismo que sus músculos, más robustos que los de los humanos modernos.

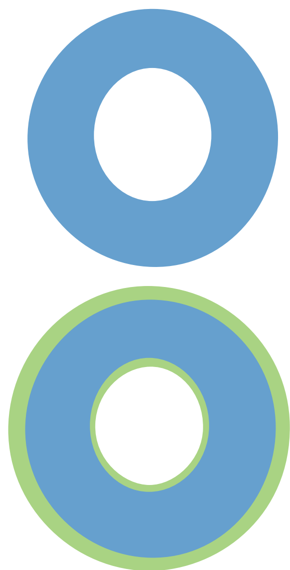
CORTESIA DE CAROL WEERTS, ZOO DE SAN LUIS/*American Scientist*

En los años setenta de la pasada centuria, Henry H. Jones, James D. Priest y sus colaboradores, de la Universidad de Stanford, tomaron radiografías de los brazos de tenistas profesionales. Se centraron en el húmero: compararon las dimensiones de la corteza ósea de los brazos hábiles y menos hábiles de los deportistas. En el brazo hábil, la superficie externa de la corteza se había agrandado; la superficie interna, reducido.

Casi 20 años después, nos fue posible disponer de las mediciones originales y calcular las propiedades geométricas de la sección. Según nuestros cálculos, el húmero del lado utilizado para jugar superaba un 40 por ciento la reciedumbre, por término medio, del húmero del lado contrario. En los tenistas no profesionales, en cambio, la asimetría media entre derecha e izquierda es, en promedio, sólo de entre un 5 y un 10 por ciento. Los participantes del estudio contaban entre 14 y 39 años de edad. Habían jugado al tenis cinco años por lo menos; empezaron entre los 5 y los 19 años. Los cambios aducidos eran más acusados en los tenistas que se habían iniciado en el deporte a una edad temprana.

Desde la publicación de nuestros resultados, otros estudios han señalado que la adaptación ósea depende también, en parte, de la edad. El esqueleto adulto sigue respondiendo a la intensificación del ejercicio, aunque procede con mayor parsimonia y de forma menos completa que el de un niño.

A diferencia de las secciones transversales de tallo humeral, el tamaño de las articulaciones de los codos izquierdo y derecho guardaba mayor semejanza en los tenistas. También en estudios sobre animales, las dimensiones de la superficie articular y la longitud del hueso (que depende del crecimiento articular) se ven menos afectados por cargas mecánicas que las secciones transversales diafíseas. La corteza de la diáfisis de





8. EL EJERCICIO INTENSO produce refuerzos notables en la robustez ósea. Este diagrama muestra la diferencia media de las dimensiones, en sección transversal, del húmero del brazo no utilizado en el juego (*azul*) y el brazo de juego (*verde y azul*) de tenistas profesionales, según mediciones del grupo que dirige Henry Jones, de la Universidad de Stanford. El autor y sus colaboradores efectuaron un segundo análisis de los datos; hallaron aumentos en la rigidez y la robustez ósea de un 62 y 45 por ciento, respectivamente, en el brazo de juego. Los cambios fueron más acusados en jugadores que empezaron su entrenamiento a edad temprana, como Amelie Mauresmo, que figura en la actualidad entre las mejores jugadoras profesionales del mundo.

STEPHANIE FREESE, BASADO EN DATOS DE "HAND DOMINANCE AND BILATERAL ASYMMETRY IN STRUCTURE OF THE SECOND METACARPAL"; T. A. ROY, C. B. RUFF Y C. C. PLATO EN *American Journal of Physical Anthropology*, N.º 94, PAGS. 203-211; 1994 *(izquierda)*; *AP/Wide World Photos*, BILL KOSTROUN/*AP Images (derecha)/American Scientist*

los huesos largos parece ser especialmente "plástica", más capacitada para responder a cargas mecánicas durante la vida, por lo que resulta útil en la reconstrucción del estilo de vida de poblaciones históricas.

El crecimiento restringido y la remodelación de la epífisis pueden ayudar a evitar incongruencias en la superficie de la articulación que la predispongan a la artritis y problemas similares.

Hemos examinado húmeros de neandertales (de 50.000 a 100.000 años de antigüedad) y de humanos anatómicamente modernos (de 10.000 a 30.000 años de antigüedad), especímenes que habían conservado ambos brazos, una rareza paleontológica. Nuestros antepasados exhibían una asimetría bilateral en reciedumbre del tallo humeral casi tan acusada como la de los tenistas modernos. Daniel Schmidt y Steven A. Churchill, de la Universidad Duke, sugieren que esta asimetría es reflejo del uso de armas o útiles, que cargaban a uno de los brazos más que al otro.

Los cinco neandertales y 19 de los 24 humanos modernos cuentan con un húmero derecho más recio. Eran, por tanto, diestros. En el grupo más numeroso de los humanos modernos, la frecuencia con la que encontramos huesos braquiales más fuertes en el lado derecho —alrededor del 80 por ciento— se acerca a la tasa de asimetría de los huesos del brazo derecho en un amplio abanico de poblaciones humanas recientes. No sorprende que sea similar también a la frecuencia con que se hace uso preferente de la mano derecha. (Numerosas fuentes afirman que el 90 por ciento de la población es diestra, pero suelen referirse a la preferencia en la escritura, que puede estar sesgada por factores culturales. Estudios transculturales muestran que la frecuencia de uso del brazo derecho es inferior para actividades como el martilleo o el lanzamiento de objetos.)

Adaptación ósea

Está claro que los huesos de las extremidades, al menos, responden a los aumentos de esfuerzo mecánico mediante la adición de material óseo para fortalecer la corteza externa. La asimetría bilateral que observamos en los tenistas profesionales y en los humanos de épocas preagrarias inducen a pensar que la robustez del hueso aumenta en un 40 por ciento o más en condiciones adecuadas.

De forma recíproca, la reducción de la carga mecánica lleva a la pérdida de materia ósea. Por ejemplo: los huesos de las piernas de los astronautas eran, por término medio, un 20 por ciento menos robustas tras pasar seis meses de vida en el espacio, en condiciones de ingravidez total, en la Estación Espacial Internacional; ello se deduce de las medidas de los módulos seccionales del cuello femoral obtenidas mediante escáneres del mineral óseo. Los pacientes paralizados experimentan pérdidas mayores en períodos más prolongados.

Los ejemplos expuestos, aunque representen casos extremos, demuestran la capacidad de los huesos para adaptarse a circunstancias variables. La robustez ósea de una persona cambia en unos cuantos años tanto como ha cambiado en promedio el vigor del esqueleto humano en el transcurso de los dos últimos millones de años. Aunque parte de este cambio evolutivo pueda ser reflejo de factores no mecánicos, entre los que se cuentan los cambios génicos, la explicación más sobria declara que el esqueleto humano se ha adaptado, pura y simplemente, a cargas y esfuerzos menores. La gracilización del esqueleto humano constituye, a buen seguro, una consecuencia directa del progreso incesante de la técnica.

Esta conclusión arroja luz sobre la etiología de las fracturas osteoporóticas. De acuerdo con lo indicado antes, las fracturas pélvicas son más frecuentes en poblaciones urbanas, con menor actividad física. El aumento notable de robustez esquelética que se adquiere a través del ejercicio físico, si se mantiene durante toda la vida, puede contribuir a prevenir tales fracturas.

Los huesos de nuestros antepasados nos revelan un esqueleto humano más recio que el actual. Los estudios sobre deportistas profesionales, sin embargo, nos aclaran que podemos todavía lograr aquella robustez. Los esqueletos que guardamos en nuestros armarios evolutivos nos enseñan valiosas lecciones sobre el estilo de vida actual y sus consecuencias.

El autor

Christopher B. Ruff, profesor y director del centro de anatomía funcional y evolución en la facultad de medicina de la Universidad Johns Hopkins en Baltimore, se formó en la de Pennsylvania. Centra su investigación en la biomecánica ósea.

Bibliografía complementaria

MOBILITY IN UPPER PALEOLITHIC AND MESOLITHIC EUROPE: EVIDENCE FROM THE LOWER LIMB. B. M. Holt en *American Journal of Physical Anthropology*, n.º 122, págs. 200-215; 2003.

EXPERIMENTAL EVIDENCE CONCERNING SPEAR USE IN NEANDERTHALS AND EARLY MODERN HUMANS. D. Schmitt y S. E. Churchill en *Journal of Archaeological Science*, n.º 30, págs. 103-114, 2003.

CORTICAL AND TRABECULAR BONE MINERAL LOSS FROM THE SPINE AND HIP IN LONG DURATION SPACEFLIGHT. T. Lang, A. LeBlanc, H. Evans, Y. Lu, H. Genant y A. Yu en *Journal of Bone and Mineral Research*, n.º 19, págs. 1006-1012; 2004.

MECHANICAL DETERMINANTS OF BONE FORM: INSIGHTS FROM SKELETAL REMAINS. C. B. Ruff en *Journal of Musculoskeletal and Neuronal Interactions*, n.º 5, págs. 202-212; 2005.

LIMB BONE BILATERAL ASYMMETRY: VARIABILITY AND COMMONALITY AMONG MODERN HUMANS. B. M. Auerbach y C. B. Ruff en *Journal of Human Evolution*, n.º 50 págs. 203-218; 2006.

Productos naturales de origen marino

Con su inmensa diversidad biológica, el mar constituye una fuente inagotable de nuevas sustancias para el tratamiento de numerosas enfermedades

José C. Jiménez, Marta Marfil, Andrés M. Francesch,
Carmen Cuevas, Mercedes Alvarez y Fernando Albericio

En el transcurso de los últimos veinte años, el mar se ha convertido en la principal fuente natural de moléculas bioactivas. Ello resulta lógico si consideramos que su extensión abarca el 70 por ciento del globo y su diversidad biológica, el 95 por ciento de la biosfera. Agréguese otro factor de interés: el 1,8 por ciento de los extractos marinos muestran actividad en ensayos *in vitro*; ese valor baja al 0,4 por ciento en los extractos terrestres.

Esta mayor actividad responde a diversos factores. De entrada, uno de carácter histórico. La vida nació en el mar; por tanto, lleva más tiempo evolucionando en ese medio. Otro factor es la presión evolutiva. Hay ecosistemas marinos con una densidad de especies mayor que la de una selva tropical; por ejemplo, los arrecifes de coral. En tales ecosistemas la competitividad es muy intensa, lo que favorece la supervivencia de quien mejora continuamente sus medios de defensa y de ataque.

Organismos marinos productores de moléculas bioactivas

En la búsqueda de organismos marinos productores de moléculas de interés, la atención se centra en especies de cuerpo blando, sésiles o dotadas de un movimiento lento y primitivos desde el punto de vista filogenético. Se trata de unas características bastante comunes en el medio marino, sobre todo en aguas cálidas. La supervivencia de los organismos que las poseen no se basa en la velocidad de natación ni en defensas físicas (conchas o espinas), sino en la generación de arsenales químicos depurados, productos de un metabolismo secundario de elevada complejidad, que se utilizan para el ataque y la defensa frente a otras especies.

Numerosas especies que antaño disponían de caparazón lo perdieron durante su evolución a favor de una defensa química. Las especies sésiles generan toxinas que impiden el asentamiento de otras. Para las especies que obtienen alimento mediante la filtración del agua, las toxinas operan como antibióticos frente a la multitud de organismos unicelulares con los que entran en contacto constante.

El mecanismo de acción de estas moléculas se dirige principalmente hacia motivos biológicos muy conservados en el curso de la evolución, por lo que resulta efectivo incluso contra especies terrestres. Estos compuestos pueden ser expulsados al agua en respuesta a una amenaza o inoculados mediante inyección con un aguijón. También pueden ser simplemente acumulados en el organismo para matar al agresor que los ingiere, salvando así al resto de la colonia y disuadiendo a futuros atacantes.

Desarrollo de un producto marino

La investigación de productos naturales de origen marino comenzó en el ecuador del siglo pasado, con el trabajo pionero de Werner Bergman, de la Universidad de Yale. Su auge se alcanzó decenios más tarde, merced a las aportaciones de John Faulkner, de la Universidad de California, Paul J. Scheuer, de la de Hawai, Kenneth L. Rinehart, de la de Illinois, y Murray H. G. Munro, de la Universidad neozelandesa de Canterbury.

El estudio de un producto marino consta de varias etapas: recolección de especímenes, determinación de su taxonomía, aislamiento de extractos o moléculas susceptibles de mostrar actividad, evaluación de su actividad, determinación de la estructura de la molécula (o moléculas) responsable de la actividad y diseño de procesos químicos que asegu-

1. DE LAS ESPECIES MARINAS se extraen numerosos compuestos con aplicaciones farmacológicas.



A. MARIN/*Investigación y Ciencia*

ren el suministro de la molécula en cuestión.

El proceso de recolección es tedioso. No sólo depende de la cuantía disponible para su investigación, sino también de condiciones externas, como la autorización administrativa. En esa etapa importa determinar también la identidad taxonómica de la especie. Junto con las técnicas de buceo en medios normalmente hostiles para el organismo humano, han mejorado los protocolos de purificación, aumentando así la cantidad total de muestra útil.

Por lo que concierne a la determinación de la actividad de la molécula de interés, se han venido incorporando nuevas técnicas que han aumentado la velocidad y la fiabilidad del ensayo, reduciéndose así la cantidad de muestra necesaria. Los procesos de rastreo automatizado a gran escala analizan la actividad de una cantidad elevada de muestras distintas en un intervalo de tiempo menor que el necesario para su obtención.

Una vez localizada una molécula de interés, se procede a la determinación de su estructura química. A este respecto, el desarrollo de las técnicas de espectrometría de masas y de resonancia magnética nuclear ha resultado crucial. Las técnicas de determinación de la masa molecular requieren cada vez menos cantidad y más complejidad en la muestra. Para ciertas moléculas se recurre a los rayos X.

El desarrollo de procesos de síntesis asegura el suministro de la molécula activa para su producción masiva y comercialización con independencia de la fuente natural. En múltiples ocasiones no resulta rentable la extracción de una fuente natural. En general, no es viable el cultivo controlado de las especies, cuyo hábitat natural se insiere en ecosistemas demasiado complejos para simularlos al depender de otros organismos, como simbiontes o presas, para su supervivencia. Se estima que el 50 por ciento de las estructuras marinas han acabado de resolverse o han debido corregirse tras su síntesis en el laboratorio.

Por último, la ruta sintética de un compuesto activo permite abordar la creación de compuestos semejantes para optimizar alguna de sus propiedades químicas y farmacológicas: solubilidad, estabilidad, potencia, toxicidad, etcétera. Y también para mejorar las propiedades ADME (*a*bsorción, *d*istribución, *m*etabolismo y *e*xcreción).



2. LA RECOLECCION E IDENTIFICACION de especies marinas han avanzado merced al desarrollo de las técnicas de buceo en medios normalmente hostiles para el organismo humano.

Compuestos peptídicos

Un péptido consiste en una cadena de aminoácidos unidos mediante enlaces amida de manera similar a las proteínas, pero mientras éstas suelen estar compuestas de centenares de aminoácidos, los péptidos suelen contar con menos de cien.

Hay 20 aminoácidos codificados en el ADN. Se denominan naturales o proteinogénicos, porque corresponden a los componentes básicos de las proteínas. Pero los péptidos pueden incorporar también otros aminoácidos no cifrados por codones nucleotídicos. Asimismo, en los péptidos se encuentran también heterociclos, ácidos alifáticos, azúcares y otros componentes estructurales.

La síntesis de las proteínas se realiza mediante el metabolismo primario, que ha persistido en el curso de la evolución. Los motivos no proteinogénicos se introducen mediante procesos del metabolismo secundario, propio de cada especie.

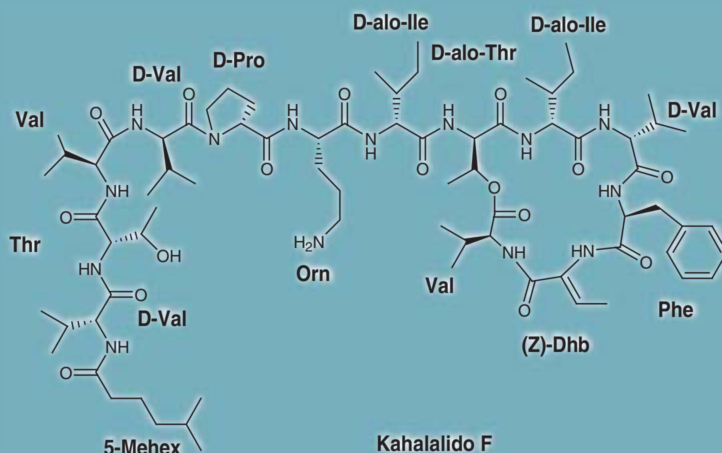


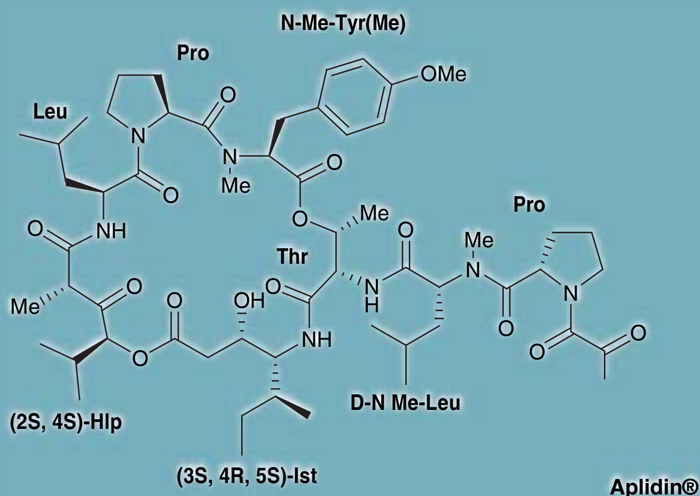
3. *ELYSIA RUFESCENS*, molusco marino sin caparazón del que se extrae el kahalalido F.

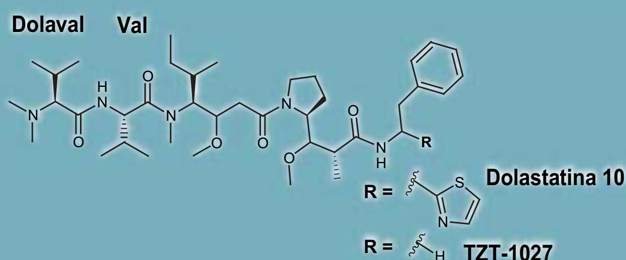
JOSE C. JIMENEZ, MARTA MARFIL, ANDRES M. FRANCESCH, CARMEN CUEVAS, MERCEDES ALVAREZ Y FERNANDO ALBERICIO

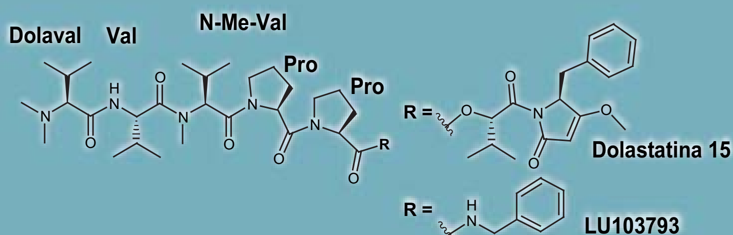
COMPUESTOS PEPTIDICOS

Una de las familias de sustancias de origen marino con mayor potencial farmacológico son los compuestos peptídicos. Aquí se muestra la estructura química de algunas de las moléculas que ya se han sometido a ensayos clínicos.









Las estructuras no proteinogénicas aumentan la selectividad de la molécula en cuestión ante su diana biológica correspondiente. Refuerzan, además, su resistencia a la degradación. Este segundo efecto reviste suma importancia, pues todos los organismos gozan de capacidad para hidrolizar proteínas y, por extensión, péptidos formados sólo por aminoácidos naturales.

Los productos naturales peptídicos de origen marino, muy ricos en motivos no proteinogénicos, presentan así una actividad biológica de notable interés. En contrapartida, tales componentes constituyen una dificultad añadida a su síntesis.

El desarrollo de métodos en fase sólida, iniciado en los años sesenta del siglo pasado por Merrifield, aceleró el descubrimiento de nuevos compuestos activos con estructura peptídica. En líneas generales, se trata de desarrollar ("hacer crecer") el péptido sobre un polímero insoluble. Al poder realizar las purificaciones en cada paso y mediante una simple filtración, el tiempo de síntesis peptídica se acorta de varios meses a pocos días. El proceso, al ser automatizable, puede aplicarse a la síntesis de extensas bibliotecas de compuestos para la búsqueda de nuevos agentes terapéuticos.

Ciclodepsipéptidos

Entre los compuestos antitumorales mencionaremos el kahalalido F. Con tan exótico nombre se designa el compuesto antitumoral más activo de una familia formada por once péptidos (kahalalidos A-H, J, M y O). Descubierto en el distrito hawayano de Kahala (de aquí su nombre). Se trata de un ciclodepsipéptido: esto es, contiene un enlace éster además de enlaces peptídicos. El kahalalido F se extrajo de *Elysia rufescens*, un molusco marino sin caparazón, y del alga *Bryopsis pennata*, que forma parte de la dieta del molusco. Para sintetizarlo, el molusco captura cloroplastos del alga y los incorpora a su metabolismo secundario. El kahalalido F forma parte del arsenal defensivo del invertebrado. Mientras que el rendimiento de extracción del compuesto del alga es de un 0,001 por ciento, en el molusco se extrae hasta el 0,1 por ciento de la masa total deshidratada.

Tras comprobarse su baja toxicidad en la fase clínica I, el kahalalido F se encuentra en ensayos clínicos de fase II para carcinoma hepatocelular, cáncer de pulmón no microcítico y melanoma. El análisis COMPARE negativo del Instituto Nacional del Cáncer de EE.UU. indica que el compuesto presenta un mecanismo de acción distinto del resto de moléculas antitumorales conocidas. Se ha observado que el kahalalido A, miembro de la familia, presenta actividad antimicobacteriana.

Otro ciclodepsipéptido de interés es el Aplidin®. Aislado a partir de un tunicado, *Aplidium albicans*, se ha sometido a ensayos de fase II para cáncer renal, colorrectal, páncreas, melanoma, cáncer de pulmón de célula pequeña (SCLC, de "small cell lung cancer"), cáncer de pulmón de célula no pequeña (NSCLC), cáncer de cabeza y cuello de útero, carcinoma medular de tiroides, linfoma no Hodgkin, cáncer de próstata y vejiga y mieloma múltiple. Se han realizado también ensayos de fase I en leucemias agudas y tumores sólidos pediátricos. Por lo observado, el fármaco no presenta hematotoxicidad significativa.

El Aplidin® se aísla en una proporción muy reducida del organismo marino. Se obtuvo inicialmente mediante semisíntesis a partir de la didemnina A, un péptido de la misma familia, más abundante pero menos activo. En la actualidad, Aplidin® se produce mediante síntesis totalmente química, lo que asegura una producción estable.

Pentapéptidos y péptidos mayores

Las dolastatinas son pentapéptidos lineales que se obtienen del molusco *Dolabella auricularia* o liebre de mar. Presentan motivos no proteinogénicos en su secuencia, entre ellos un enlace tipo éster (depsipéptidos). Su bajo peso molecular facilita la síntesis química. Los miembros más importantes son las dolostatinas 10 y 15, cuya actividad anticancerígena se ha sometido a estudios clínicos. También han entrado en fase clínica un derivado sintético de cada una de ellas: el TZT-1027 para la dolostatina 10 y el LU103793 para la dolostatina 15. Todos estos compuestos muestran propiedades antimitóticas, esto es, impiden la división celular al inhibir la polimerización de la tubulina.

Otra familia destacada son las conotoxinas. Constan de entre 8 y 31 aminoácidos. Se aíslan de conos, un género de moluscos marinos que comprende más de 500 especies. Estos organismos inyectan a sus víctimas un poderoso veneno paralizante, que consta de hasta 200 moléculas bioactivas distintas. Se alimentan de gusanos, otros moluscos o incluso de peces. En la actualidad se dispone de una biblioteca de conotoxinas de más de 50.000 compuestos y de más de 100 patentes con el término conotoxina.

Las conotoxinas se dividen en subgrupos en función de su acción biológica y composición. Operan como agonistas o antagonistas de receptores de la proteína G; pueden asimismo bloquear de forma selectiva canales de iones. Desarrollan una actividad analgésica y se aplica en la terapia de patologías del sistema nervioso central. La punta de lanza de esta familia de compuestos corresponde al SNX-111. Esta Ω-conotoxi-



4. *APLIDIUM ALBICANS*, tunicado del que se extrae el Aplidin®.

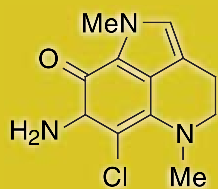


5. *DOLABELLA AURICULARIA*, molusco del que se obtienen las dolastatinas.

JOSE C. JIMENEZ, MARTA MARFIL, ANDRES M. FRANCESCH, CARMEN CUEVAS, MERCEDES ALVAREZ Y FERNANDO ALBERICIO

COMPUESTOS HETEROCICLICOS ALCALOIDES

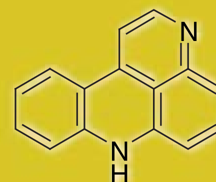
Un gran número de los compuestos de origen marino con bioactividad son alcaloides, es decir, cuentan con uno o más átomos de nitrógeno en su estructura química. Se presentan aquí algunos ejemplos.



Isobatzellina C (pirroloquinolina)



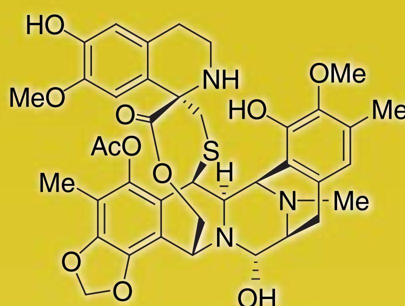
Plakinidina D



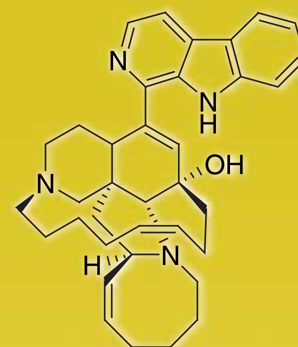
Pirido[2,3,4-*kl*]acridina



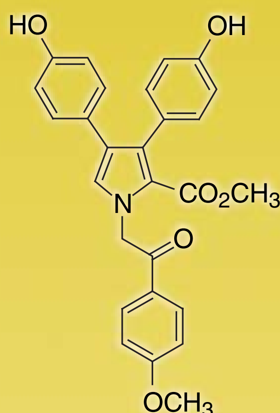
Variolina B



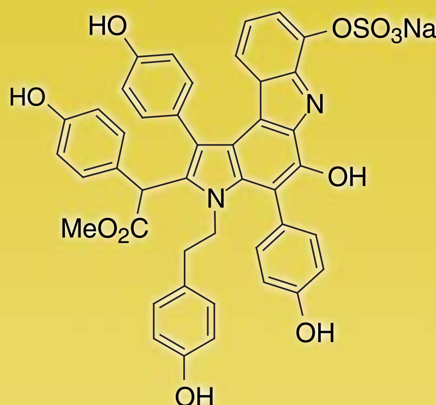
Trabectedina o ET-743
Yondelis™
(ecteinascidina)



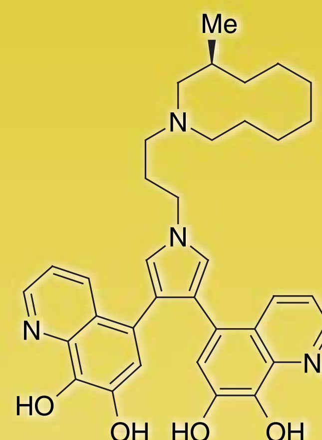
Manzamina A



Lamellarina O



Dictiodendrina A



Halitulina

na de 25 aminoácidos se ha aprobado para el tratamiento del dolor crónico en enfermos con cáncer o sida; multiplica por mil la eficacia de la morfina y no manifiesta los efectos secundarios de ésta. Varios laboratorios farmacéuticos esperan comercializar pronto otros compuestos de esta familia para el tratamiento del dolor, el Alzheimer, la esquizofrenia, el asma y la epilepsia.

Compuestos heterocíclicos alcaloides

Los compuestos heterocíclicos corresponden a moléculas que incluyen heteroátomos (átomos distintos del carbono) en un anillo de entre tres y siete átomos. El término alcaloide se refiere originariamente a los compuestos naturales aislados mediante extracción en medio ácido, que muestran, por tanto, un comportamiento básico (alcalino). Estas sustancias fueron las primeras en aislarse de fuentes naturales con actividad de interés. Mas tarde se comprobó que dicho comportamiento básico se debe a la presencia de nitrógeno. Estos compuestos se sintetizan mediante el metabolismo secundario, propio de cada especie, a partir, sobre todo, de aminoácidos naturales altamente modificados.



6. *CONUS GEOGRAPHUS*. De éste y otros moluscos del género de los conos se extraen las conotoxinas.

El descubrimiento de sustancias naturales de este tipo resulta muy atractivo desde el punto de vista farmacéutico, pues la mayoría de los compuestos comerciales actuales pertenecen a esta clase, por lo que sus probabilidades de éxito son mayores. Sin embargo, hasta los años setenta del siglo pasado apenas se habían aislado metabolitos de fuentes marinas que incluyeran nitrógeno en su estructura. En una revisión de estudios de 304 compuestos publicada por Faulkner en 1977, que cubría los tres años precedentes, aparecen sólo 32 compuestos nitrogenados. El refinamiento de las técnicas de aislamiento (sobre todo las de purificación de compuestos polares solubles en agua) y los métodos de aislamiento monitorizados por técnicas de bioensayo dieron un giro busco a la situación. De las 11.964 estructuras de origen marino recogidas en la base de datos MarinLit, 3564 (el 29,8 por ciento) contienen al menos un átomo de nitrógeno; el 22,8 por ciento contienen 2 o más átomos de nitrógeno.

La mayoría de los nuevos compuestos marinos de esta clase se obtienen de esponjas, aunque también se han extraído de organismos tan dispares como moluscos, corales, algas y ascidios, entre otros.

Pirroloquinolinas

Las pirroloquinolinas se obtienen de esponjas. En el esqueleto de estas moléculas encontramos un tetrahidropirrol y una quinolina, que les dan nombre. De manera más pormenorizada, las esponjas del género *Zyzzya* producen damirona C, discorhabdina A y makaluvaminas A-F y H-N; las esponjas *Batzella sp.* sintetizan batzellinas AC, isobatzellinas A-D; *Damiria sp.* damironas A-B; *Histodermella sp.* makaluvamina G. En *Latrunculia sp.* y *Prianos melanos* se han hallado las discorhabdinas A-D, pirroloquinolinas de mayor complejidad. Su interés reside en una notable actividad citotóxica combinada con la habilidad de algunas de bloquear la función estructural de la topoisomerasa II, lo que las convierte en interesantes para tratamientos antitumorales.

Plakinidinas y piridoacridinas

Las plakinidinas A-C se aislaron de la esponja *Plakortis*. Son alcaloides eficaces contra el parásito gastrointestinal *Nippostrongylus brasiliensis*. La plakinidina D se aisló de dos ascidias, *Didemnum sp.*, originaria de Indonesia, y *Didemnum rubeum*, colectado en la República de Palau.



7. *KIRKPATRICKIA VARIOLOSA*, esponja roja de la que se obtienen las variolinas.

JOSE C. JIMENEZ, MARTA MARFIL, ANDRES M. FRANCESCH, CARMEN CUEVAS, MERCEDES ALVAREZ Y FERNANDO ALBERICIO



8. *ECTEINASCIDIA TURBINATA,* tunicado caribeño del que se aíslan las ecteinascidinas.

Dentro del grupo de alcaloides policíclicos aromáticos destaca una serie de compuestos que presentan en su estructura la piridoacridina, un sistema tetracíclico. El primer alcaloide de este grupo, la amfimedina, se caracterizó en 1983. Desde entonces se han descrito más de 40 compuestos relacionados procedentes de organismos tan dispares como esponjas, tunicados, una anémona y un prosobranquio. Se han propuesto dos hipótesis para explicar tan variada procedencia. De acuerdo con la primera, el origen de esos productos naturales son los microorganismos marinos que se hallan en simbiosis con invertebrados de los distintos grupos. La segunda hipótesis defiende que el propio huésped genera los productos en cuestión a partir de los aminoácidos aromáticos presentes en el metabolismo de la mayoría de los organismos marinos.

De las sustancias en cuestión, las piridoacridinas revisten interés no sólo por su estructura inédita, sino también por su notable actividad biológica y farmacológica. Por ejemplo, la ascididemina activa la salida de iones calcio del retículo sarcoplasmático de manera similar a la cafeína, siendo siete veces más potente que ésta. La mayoría de los compuestos de este grupo muestran citotoxicidad ante linfoblastos, células leucémicas o células cancerosas de la nasofaringe o del colon humano.

Las piridoacridinas citotóxicas frenan la proliferación celular, el crecimiento celular o ambos. Operan sobre la maquinaria de reproducción: se intercalan en la doble hélice del ADN o bien inhiben enzimas implicadas en la replicación del ADN.

Variolinas

En 1994, el equipo de Munro aisló las variolinas de la esponja roja *Kirkpatrickia variolosa*, recogida en aguas de la Antártida. Integra un grupo de cuatro alcaloides: variolina A, B, D y *N*-(3')-metiltetrahidrovariolina B. Reviste un interés notable por motivos biogenéticos y estructurales. Las variolinas constituyen el único ejemplo de producto natural con un sistema heterocíclico condensado de piridopirrolopirimidina, sustituido por un grupo hidroxilo y un amino.

Según los ensayos *in vitro*, la variolina B es la que presenta mayor actividad ante la línea celular de leucemia P-388 y ante el virus del herpes simplex tipo I. La variolina A y la *N*(3')-metiltetrahidrovariolina B presentan menor actividad frente a P-388, pero esta última muestra una actividad notable frente a HCT-116 (línea celular del tumor humano de colon) y *Saccharomyces cerevisiae*. La variolina D se mostró inactiva en todos los ensayos. Hasta la fecha se han publicado tres métodos de síntesis de la variolina B y varias rutas para la obtención de la desoxivariolina B.

Ecteinascidinas y manzaminas

Las ecteinascidinas se aislaron del tunicado caribeño *Ecteinascidia turbinata*. Muestran una potente actividad antiproliferativa ante una gran variedad de tumores. Ello las ha convertido en candidatos atractivos para su desarrollo como agentes anticancerígenos y como objetivo sintético. El fármaco Yondelis™ (trabectedina, ET-743) desarrolla la mayor actividad antitumoral; se encuentra en fase clínica II en Europa y EE.UU. para sarcomas de tejidos blandos, cáncer de ovario, endometrio y mama. Hasta la fecha, se han descrito dos métodos de síntesis del Yondelis™ (trabectedina). Asimismo, se ha desarrollado un proceso semisintético que asegura su



9. *LAMELLARIA sp.,* molusco prosobranquio del que se extrae la lamellarina A.

JOSE C. JIMENEZ, MARTA MARFIL, ANDRES M. FRANCESCH, CARMEN CUEVAS, MERCEDES ALVAREZ Y FERNANDO ALBERICIO

producción industrial. Este proceso utiliza como producto de partida la cianosafracina B, un antibiótico de origen bacteriano que se produce a partir de la fermentación de la bacteria *Pseudomonas fluorescens*. Mediante la modificación de este antibiótico se accede a otros compuestos de la misma familia, entre los que se encuentra Yondelis™.

Otros alcaloides marinos de interés son las manzaminas. Igual que las ecteinascidinas, las manzaminas se caracterizan por la presencia de un núcleo de β-carbolina unida a un sistema policíclico complejo. Desde el aislamiento de la manzamina A de la esponja Okinawan del género *Haliclona*, más de 40 alcaloides del mismo grupo se han aislado de nueve esponjas distintas.

Las manzaminas muestran propiedades citotóxicas, insecticidas y antibacterianas. Desarrollan, asimismo, una importante actividad curativa contra la malaria en animales modelo. La mayoría de los medicamentos contra la malaria, la tuberculosis, la toxoplasmosis y otras patologías infecciosas no erradican la enfermedad. Además, empiezan a despertar resistencia o rinden efectos secundarios. De ahí la necesidad de idear nuevos fármacos, menos tóxicos, capaces de erradicar dichas enfermedades. Ello explica el interés de las manzaminas, considerada su eficacia potencial en el tratamiento de estos trastornos.

Llama la atención la notable diversidad de manzaminas que se han aislado de esponjas. ¿Cuál es el origen de estos metabolitos? Se supone que la responsable de la producción de las manzaminas es la flora microbiana de la esponja; por tanto, tamaña variedad química debe ser resultado de la acción del huésped, que transforma estos alcaloides en productos secundarios.

Dictyodendrinas

Las dictyodendrinas A-E se aislaron de la esponja marina japonesa *Dictyodendrilla verongiformis*. Inhiben la telomerasa, una enzima que restituye la longitud del telómero. La actividad de la telomerasa se observa en un 90 por ciento de los tumores humanos, pero no en las células normales. Los inhibidores de la telomerasa son también potentes agentes antitumorales.

Algunos inhibidores sintéticos de la telomerasa han dado resultados satisfactorios en ensayos clínicos. Se han descrito varios productos naturales con actividad inhibidora de la telomerasa, pero hasta 2002 no se descubrió ningún producto natural marino que mostrara dicha actividad a una concentración de 50 miligramos por mililitro. Las dictyodendrinas constituyen, por tanto, los primeros productos naturales marinos con este mecanismo.

Halitulina

El grupo que dirige Y. Kashman, de la Universidad de Tel-Aviv, aisló el alcaloide marino halitulina de la esponja marina sudafricana *Haliclona tulearensis*. La halitulina presenta una fuerte actividad citotóxica; inhibe el crecimiento de tumores de las líneas celulares humanas P-388, A-549, HT-29 y MEL-28. La elevada actividad de la halitulina, unida a su peculiar estructura química, ha estimulado los esfuerzos sintéticos. En 2003 se publicó la primera síntesis total de este alcaloide.

Lamellarinas, lukianoles y ningalinas

Por último, hemos de mencionar ciertos compuestos aislados de esponjas, ascidios, moluscos y otros organismos marinos. Nos referimos a las lamellarinas, los lukianoles y las ningalinas, que se caracterizan por presentar un anillo de pirrol sustituido en las posiciones 3 y 4 por grupos polihidroxi o polimetoxifenilo. En las lamellarinas Q y O, el anillo de pirrol se halla polisustituido; en las ningalinas, lukianoles o lamellarinas pentacíclicas, condensado en otros anillos.

Scheuer aisló el lukianol A de un tunicado de aguas del Pacífico. Dotado de actividad citotóxica, el lukianol A inhibe el crecimiento de las líneas celulares derivadas del carcinoma epidérmico humano. PharmaMar patentó la lamellarina K, entre otras, para el tratamiento de tumores resistentes a múltiples fármacos.

La lamellarina A se ha aislado de la *Lamellaria sp.*, un molusco prosobranquio recolectado en Koror, Palau. Pese a la abundancia de lamellarinas y lukianoles, el número de vías sintéticas que se han desarrollado para su obtención es limitado. Los métodos empleados divergen en la forma de preparación del anillo de pirrol.

Después de más de 50 años de investigación se puede decir que los productos marinos finalmente están adquiriendo relevancia en el sector farmacéutico. En la actualidad contamos con más de 20 compuestos marinos en fase de desarrollo clínico; otros muchos se hallan en fases preclínicas avanzadas. No cabe ninguna duda de que un gran número de los futuros fármacos vendrán del mar. Aunque la indicación terapéutica de mayor importancia es el cáncer, los productos de origen marino se revelan también idóneos para el tratamiento de la inflamación, el dolor, la infección y el sistema nervioso central (alzheimer y esquizofrenia).

Los autores

Fernando Albericio y **Mercedes Alvarez** comparten la docencia en la Universidad de Barcelona con el trabajo en el Instituto de Investigación Biomédica de Barcelona del Parque Científico de Barcelona (IRBB-PCB), donde **José Carlos Jiménez** y **Marta Marfil** han realizado su doctorado. **Carmen Cuevas** y **Andrés M. Francesch** llevan a cabo su labor investigadora en la empresa biotecnológica PharmaMar.

Bibliografía complementaria

CHEMICAL APPROACHES TO THE SYNTHESIS OF PEPTIDES AND PROTEINS. P. Lloyd-Williams, F. Albericio, E. Giralt. CRC; Boca Raton, 1997.

DRUGS FROM THE SEA. Dirigido por N. Fusetani. Karger; Basilea, 2000.

FROM PRODUCTION OF PEPTIDES IN MILLIGRAM AMOUNTS FOR RESEARCH TO MULTITONS QUANTITIES FOR DRUGS OF THE FUTURE. T. Bruckdorfer, O. Marder, F. Albericio en *Current Pharmaceutical Biotechnology*, vol. 5, pág. 29; 2004.

LAMELLARINS: ISOLATION, ACTIVITY AND SYNTHESIS. P. Cironi, F. Albericio, M. Alvarez en *Progress in Heterocyclic Chemistry*, vol. 16, cap. 1. Dirigido por G. W. Gribble y J. A. Joule. Pergamon; Oxford, 2004.

Norbert Treitz

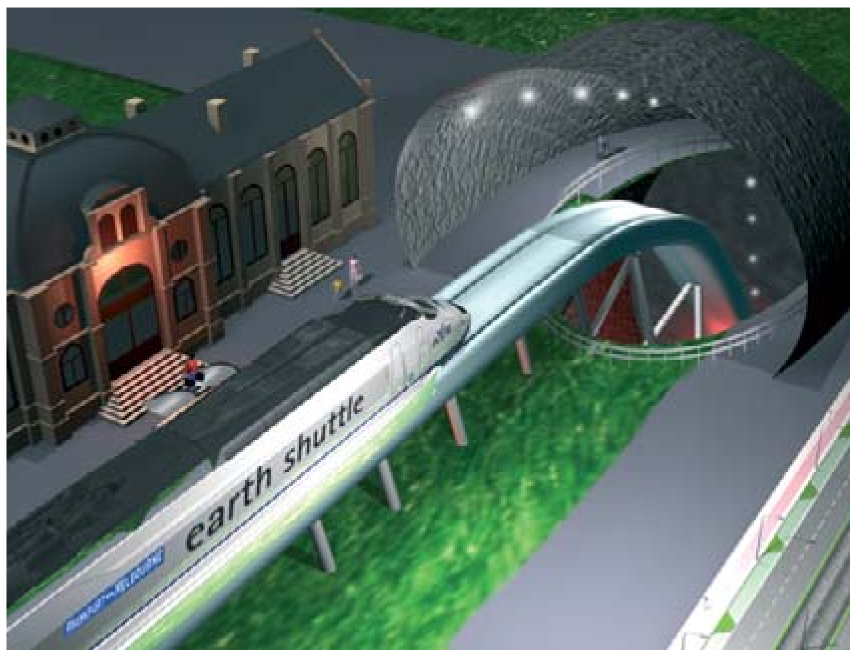
Tránsito pendular a través de la Tierra

¿Por qué se ha de ir en avión de Europa a Asia? El camino más corto entre dos puntos de una esfera no discurre por la superficie, sino a través del cuerpo de la esfera. En el caso extremo —que los dos puntos estén diametralmente opuestos— la diferencia asciende a algo más de un tercio del trayecto. Y mejor aún: no habría que ocuparse ni de la propulsión ni de la frenada; ya se encargaría automáticamente la fuerza de la gravedad.

Excavemos, pues, un túnel rectilíneo desde el punto de partida hasta el de destino a través de la esfera terrestre. Miremos sin mezquindad más allá de las dificultades técnicas que nos depararía no sólo excavar un agujero de miles de kilómetros de longitud, sino la temperatura del interior terrestre, que fundiría cualquier construcción. Y supongamos, como verdaderos teóricos, que la obra sería tan maciza que compensaría el material eliminado en el ojo del túnel; el campo gravitatorio seguiría siendo, pues, el mismo que antes.

Hagamos que los trenes viajen de un extremo al otro sin fricción, sobre raíles magnéticos. La fuerza de la gravedad acelerará el tren durante la primera mitad del viaje y lo frenará durante la segunda mitad en la misma medida, de tal manera que pare, con toda precisión, en la estación de destino. En el caso de un túnel que pasara justo por el centro de la Tierra, hasta los raíles serían prescindibles, pues la fuerza actuaría siempre en el sentido de avance o justo en el sentido contrario.

Un túnel de ese tipo tendría, para la mayoría de los países de la Tierra, una salida al mar (*véase la figura 2*). Una parte de los neozelandeses tiene a una parte de los españoles y portugueses como antípodas, es decir, diametralmente opuestos; el resto de Europa mira a los mares del Sur. Allí hay un archipiélago deshabitado que lleva el nombre de Islas Antípodas; quien se lo puso debía de ser oriundo de cerca del Canal de la Mancha.



1. Trabajo en Europa, velada en Australia: el tránsito pendular a través del largo túnel al centro de la Tierra lo hace posible, con poco gasto de energía y en 42 minutos por viaje.

SIGANIM/*Spektrum der Wissenschaft*

Viaje en caída libre al interior de la Tierra

Las estaciones de tren deben tener andenes horizontales. Desde ellos se iría más o menos empinadamente hacia abajo, sobre las cuerdas —entiéndase la palabra con el significado de "segmentos recto entre dos puntos de una esfera"— intraterrestres. Para poner el tren en marcha bastaría con empujarlo desde la zona horizontal hasta donde empezase su declive. A partir de ahí, comenzaría un viaje en caída libre, como en una montaña rusa o un descenso de esquí. La velocidad aumentaría hasta el punto medio de la cuerda y luego disminuiría; al llegar al destino, el tren se movería a velocidad despreciable hasta alcanzar el andén horizontal de la estación.

¿Qué se notaría en un viaje de tren de este tipo? Nos pasamos casi toda nuestra vida sujetos a las fuerzas elásticas de un mueble, cuando estamos sentados o acostados, o del suelo, que nos salva de una caída libre; consecuentemente experimentamos este estado como el normal y la caída libre como un peligro o, al menos, como una situación emocionante. Un viaje a través del centro de los planetas se experimentaría como una caída libre —¡también la segunda parte, de subida!—, a la que denominaríamos ingravidez.

El paso por el punto más bajo del recorrido —sea o no el centro de la Tierra— no sería perceptible para los ocupantes. No distinguirían entre arriba y abajo. Antes de la partida se sentarían en butacas iguales a las de un tren ordinario, pero en realidad los asientos serían innecesarios en un recorrido que atravesase el centro de la Tierra. La tripulación se aseguraría de que todos los pasajeros tuviesen puestos sus cinturones de seguridad y de que el equipaje estuviera bien sujeto. Al partir, el tren se inclinaría empinadamente hacia adelante

y abajo, como al final de la subida de una montaña rusa. A partir de ahí, caería de cara sin parar y se abrirían automáticamente ante cada pasajero generosas bolsas de papel. A llegar al destino, se inclinaría de nuevo el tren y los pasajeros se encontrarían —¿sorprendentemente?— sentados con una sensación normal de gravedad. Como si se hubiera realizado el mismo viaje por la semicircunferencia de la Tierra.

La verdad sobre el centro de masas

Bien mirado, esta manera de viajar, si se hace abstracción de la inverosimilitud del túnel, no resulta tan descabellada. Al fin y al cabo, hemos aprendido en la escuela que se puede suponer que la fuerza gravitatoria que actúa sobre un cuerpo extenso lo hace sólo en un punto del cuerpo: el centro de masas. De la misma manera, se podría sustituir la fuerza que ejerce un cuerpo extenso como la Tierra por la fuerza de un punto, de la misma masa que el planeta, que se hallase en su centro de masas. Como el centro de masas y el centro geométrico coinciden en la práctica, no extrañaría que nuestros trenes en tránsito por el interior de la Tierra experimentasen una aceleración terrestre dirigida hacia el centro del planeta.

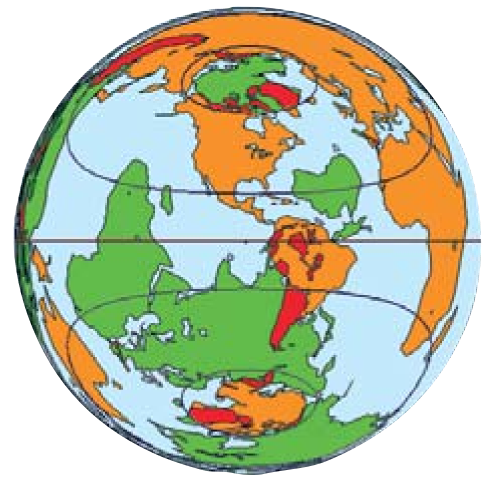
Y en ese caso, así sería, en efecto. Sin embargo, la sabiduría escolar dista de ser correcta en general. En el laboratorio, donde cabe asumir que el campo gravitatorio de la Tierra es homogéneo, vale. Falla en el interior de la Tierra, como vamos a ver a continuación.

Para nuestros trenes fantásticos tenemos que pensar con algo más de exactitud. Una formulación menos usual, pero mucho más esclarecedora de la ley de la gravitación (*véase el recuadro*), nos ayuda a comprender dos aspectos esenciales del campo gravitatorio de distribuciones isótropas de masas, esto es, de esferas cuyas densidades de masa sólo dependan de la distancia al centro y de nada más. Primero: para dichas esferas, la precipitada sabiduría escolar sobre el centro de masas es válida: su campo gravitatorio —bien entendido, en el espacio exterior— es el mismo que el de un punto de igual masa en el centro de la esfera. Segundo: el campo gravitatorio de un cascarón esférico isótropo en torno a un núcleo hueco es en éste igual a cero. Sobre nuestro tren subterráneo actúa, pues, en cada punto de su camino sólo una parte de la Tierra, aquella que está más cerca del centro de la Tierra que el propio tren. Y es que el resto de la Tierra viene a ser como un cascarón hueco: sin efecto gravitatorio.

En lo que sigue supondremos por simplicidad que la distribución de masas en la Tierra no es sólo isótropa —en efecto, lo es con gran exactitud—, sino también homogénea. La Tierra no tendría, como en la realidad, un núcleo pesado y un manto ligero, sino una densidad uniforme en todos los puntos igual a la densidad media de la Tierra real, unos 5,5 gramos por centímetro cúbico.

Cuando el tren esté a una distancia r del centro de la Tierra, sólo será atraído, *de facto*, por la parte interior de la esfera de radio r. Su masa será proporcional al volumen $4\pi r^3/3$; de ello se obtiene que la aceleración g es igual a $-Dr$, con la constante $D = 4\pi dG/3$, proporcional a la densidad d. Para una masa de prueba m en el interior de la esfera se tendrá, pues, la fuerza gravitatoria $mg = -rDm$ orientada hacia el centro. Ocurre como en el muelle helicoidal de Hooke, el oscilador armónico de la clase de física: la fuerza que lleva hasta el punto de equilibrio es proporcional a la distancia hasta dicho punto de equilibrio.

Movámonos radialmente del centro hacia afuera. Tendremos como potencial $U = Dr^2/2 = D(x^2 + y^2 + z^2)/2$. (La energía potencial del móvil en este potencial es igual a su masa por el valor del potencial en el punto donde se encuentre.) Para el centro S se tiene que $U = 0$, lo que no es más que una elección arbitraria. La fórmula es válida para todo el espacio interior, y da para $r = R$ —es decir, en la superficie— el potencial $U = DR^2/2$ y la intensidad de campo = aceleración de caída $g = -DR$. En el espacio exterior vale $U = 3/2\ DR^2 - DR^3/r$. Para la esfera homogénea, pues, un tercio de la diferencia de potencial del centro hasta el infinito corresponde al interior, dos tercios al exterior. Si desea escapar del centro hasta el infinito con una escalera adecuada (la de Jacob, alargada hacia el fondo de la Tierra) y ya ha llegado hasta la superficie, tendrá hecho un tercio del trabajo (*figura 3*).



2. Superposición de dos mapamundis. En rojo, las regiones donde los antípodas respectivos están en suelo seco. En azul claro: ambos lados con agua. En verde y naranja: agua al otro lado de tierra.

NORBERT TREITZ/*Spektrum der Wissenschaft*

Para una cuerda de esfera en la dirección de un eje de coordenadas x, con $z = 0$ y un valor de y constante, se tiene que $U = D(x^2 + y^2)/2$; las componentes de la aceleración las encontramos derivando: $g_x = -Dx$, $g_y = -Dy$ (constante) y $g_z = 0$. Es decir: una componente constante de la gravedad presiona al carril transversalmente y la aceleración gravitatoria paralela al carril es proporcional a la distancia al punto medio de éste, aunque orientada en sentido contrario.

Es notable que el factor D sea independiente de las otras coordenadas. Un vagón que ruede (o deslice) libremente oscilará alrededor del punto medio de su carril igual que una masa pendiente de un muelle, con una frecuencia angular $D^{1/2}$; la masa se elimina en el cálculo. Que el vagón oscile de un extremo al otro de la cuerda o bien sólo alrededor del centro de ésta, o que la cuerda una dos ciudades vecinas o atraviese diametralmente la esfera, no cambia en nada el valor de dicha frecuencia angular.

Por tanto, podremos instalar una red de cuerdas cortas y largas de período $T = 2\pi(1/D)^{1/2} = 2\pi[3/(4\pi Gd)]^{1/2}$, que sólo depende de la densidad de la Tierra. Para T se obtiene un valor de 84 minutos; media oscilación, esto es, el recorrido de los puntos A a B de la superficie terrestre, se recorrerá, pues, en 42 minutos. Este

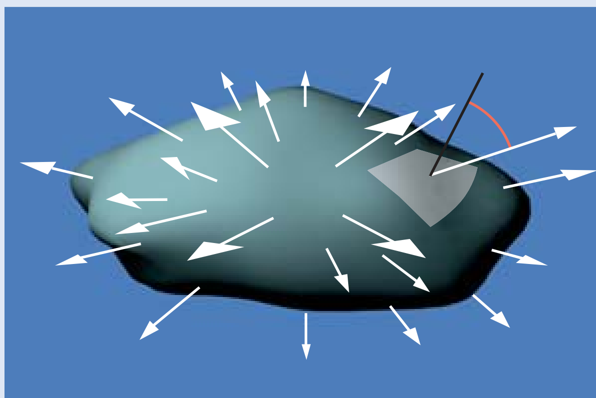
Una forma insólita de exponer la ley de la gravitación

EN LA ATRACCION MUTUA ENTRE DOS MASAS no fluye materia de una masa a la otra; pero imaginar que sí lo hace puede resultar de ayuda. El formalismo matemático es el mismo que para una corriente genuina.

Supongamos, pues, que cada masa puntual es fuente de cierta irradiación, que mana uniformemente hacia todas partes. (En el caso de cargas eléctricas habría "fuentes" y "sumideros"; los caminos del ente eléctrico intercambiado se representan gráficamente mediante líneas de campo representadas gráficamente.) Para un observador en cierto punto del espacio, ese algo irradiado se hace perceptible como una aceleración que actúa en sentido contrario al sentido de la corriente, o como una fuerza, que es lo mismo salvo por un factor de proporcionalidad, la masa. Al aumentar la distancia a la fuente, lo emitido se diluye cada vez más: no tiene ninguna otra fuente que las masas y no hay ningún sumidero; por tanto, durante el camino ni aumenta ni disminuye, pero el espacio por el que se reparte cada vez es mayor.

Para expresar esta "condición de continuidad" se rodean todas las fuentes (esto es, todas las masas, puntuales o extendidas) que interesen con una envoltura cerrada de forma arbitraria. La envoltura no tiene que ajustarse a la masa, sólo encerrarla. La cantidad total de ese algo que fluye a través de la envoltura es proporcional a la masa total de las fuentes encerradas por la envoltura. (El método seguido para el cálculo de la cantidad total que fluye se explica en la figura; los expertos reconocerán en esta formulación el teorema integral de Gauss.)

Como cada fuente genera en cantidad proporcional a su masa una emisión, ésta fluirá también a través de la envoltura. Sólo tras una consideración más detenida se muestran las sorprendentes consecuencias de esta aparente obviedad: si se reordenan las masas dentro de la envoltura, cambiarán las fuerzas en cada punto de la envoltura, pero no la integral (una especie de suma total) del producto escalar de la fuerza y la normal a la superficie sobre toda la envoltura. Lo mismo vale si se



SIGANIM/*Spektrum der Wissenschaft*

El flujo a través de un fragmento de la envoltura es proporcional a la aceleración en dicho punto, aunque sólo a la parte perpendicular a la superficie (el producto escalar del vector de corriente y la normal a la superficie).

hincha o contrae la envoltura, siempre que encierre las masas de antes. Las masas dispuestas en el exterior de la envoltura no repercuten en la integral; su emisión va "de paso".

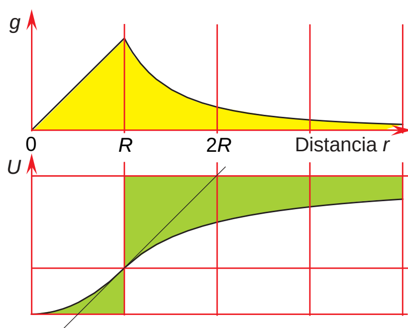
La formulación de la ley de la gravitación a que nos referíamos es indirecta: no informa de la fuerza en un punto, sino sólo de la integral sobre toda una superficie. Como si una horda de hormigas bullera sobre la superficie y midiera en cada punto el módulo y la dirección del flujo que emiten las masas encerradas por la superficie. Se suman todos los resultados de sus mediciones para obtener un flujo total a través de la envoltura; mas, a partir de ese valor numérico no se puede recuperar el flujo en cada uno de los puntos de la envoltura.

A menos que la envoltura sea esférica y la distribución de masas en su interior, alrededor del centro de la esfera, tenga simetría esférica. Entonces fluirá de cada punto de la envoltura igual cuantía en una dirección determinada, exactamente hacia afuera; la aceleración en cada punto de la superficie esférica será en módulo la misma y dirigida hacia el centro. De la integral de una función constante se puede calcular el valor de dicha función en cada punto.

Si sólo hay una masa puntual en el centro de la esfera, el flujo total será igual a la fuerza en ese punto de la envoltura por la superficie de la esfera $4\pi r^2$. Dividamos por r^2: la aceleración gravitatoria que ejerce una masa puntual apunta hacia ésta y es proporcional a su masa e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, tal y como lo expresó Isaac Newton. La constante de proporcionalidad, aparte de un molesto factor 4π, no es otra que la constante gravitatoria G, y la disminución con el cuadrado de la distancia aparece como consecuencia lógica de que el espacio tenga 3 dimensiones.

Pongamos en el centro, en vez de una masa puntual, una esfera maciza isótropa: su densidad puede variar, pero sólo en función del radio. La estructura sigue teniendo simetría esférica. Lo mismo que en el caso precedente, a partir de la integral sobre la superficie podremos calcular el valor g (siempre igual) de la aceleración en cada punto de la superficie. Obtendremos el resultado $g = MG/r^2$, donde M es la masa total encerrada por la esfera de radio r, sea cual sea su estratificación radial. Para un planeta macizo de forma esférica se puede así calcular g en el espacio exterior, sin necesidad de conocer la estratificación de M en su interior, sino sólo su distribución, independiente de la dirección. El resultado es exacto, no una aproximación. Este es el otro caso excepcional en que está permitido representar la masa total de un planeta concentrada en el centro de masas.

¿Qué sucede, si en una estructura de simetría esférica no hay ninguna masa encerrada, sino un vacío circundado por una esfera concéntrica? En ese caso, la integral de flujo será igual a cero, y por los mismos motivos que arriba, la aceleración tendrá en todos los puntos un valor igual a cero. Así llegamos de rebote a la conclusión de que el campo gravitatorio en el interior de una bola hueca e isótropa es en todas partes igual a cero.



3. La aceleración de caída *g* y el potencial *U* (con tres ceros a escoger) para la esfera homogénea dependen de la distancia, aunque de manera diferente dentro y fuera de la esfera.

NORBERT TREITZ/*Spektrum der Wissenschaft*

tiempo será el mismo para cualquier cuerda; ni siquiera cambiaría si la Tierra fuese mayor o menor, mientras la densidad fuese la misma.

La velocidad, en cambio, será tanto mayor cuanto más empinadamente penetre el túnel en la Tierra. En el caso extremo de que pasase por el centro de la Tierra, alcanzaría los 7,9 kilómetros por segundo en el centro del recorrido.

El horario de los trenes para una red global compuesta de diversas cuerdas tendría que ser muy rígido: a cada hora en punto saldría de cada estación un tren hacia cada destino, y todos llegarían 42 minutos más tarde, hasta el que pasa por el centro de la Tierra. Se tendrían entonces 18 minutos para eventuales trasbordos. En cada punto se podría efectuar el enlace si todos los recorridos fuesen de doble sentido, con un tren pendular por sentido. La denominación "tren pendular" se ha de entender aquí literalmente, por el movimiento de péndulo del tren.

El viaje en cuerdas cortas no se distinguiría de quedarse en el andén. Sobre una cuerda que se acerque a un porcentaje *p* del radio al centro del planeta, se notará siempre un porcentaje *p* de la gravedad acostumbrada, pues los raíles tendrán que aguantar este porcentaje *p* y presionarán correspondientemente desde el suelo del vehículo a los pasajeros; lo harán de forma constante a lo largo de todo el recorrido y siempre con perfecta perpendicularidad respecto al raíl, hacia "arriba". En un viaje de este tipo no se notará cuándo se pasa de la primera a la segunda mitad.

Juan M.R. Parrondo

La paradoja de San Petersburgo

En 1738, Daniel Bernoulli estudió un simple juego de azar sobre el que continúan reflexionando economistas, filósofos y matemáticos. Se comienza con un "bote" de dos euros. Se lanza una moneda al aire: si sale cruz, yo doblo la cantidad que hay en el bote; si sale cara, usted se lleva el bote disponible en ese momento. Es decir, si la primera tirada es cara, usted gana 2 euros, si la primera tirada es cruz y la segunda cara, gana 4 euros, si la primera cara sale en la tercera tirada gana 8 euros, y si la primera cara sale en la tirada n-ésima gana 2^n euros. Obviamente, lo que a usted más le conviene es que salga cara lo más tarde posible. En cualquier caso, usted gana siempre algo de dinero, por lo que es justo que yo le cobre alguna cantidad o *cuota* para permitirle participar en el juego. La pregunta que se hizo Bernoulli, y que en cierto modo sigue sin resolverse, es: ¿cuál es la cuota de entrada que se debería cobrar para que el juego fuera justo?

Para cualquier sorteo "normal", la cuota de entrada justa debe ser igual al valor medio de la ganancia. Por ejemplo, cuando compra un número en una lotería de, digamos, 100 números, si el premio es de 1000 euros, el precio del boleto, o cuota de entrada en el sorteo, debería ser de 10 euros. Para usted que compra el boleto, la probabilidad de ganar los 1000 euros es 1/100 y la probabilidad de no ganar nada es 99/100. Por tanto, el valor medio de la ganancia es $1000 \times (1/100) = 10$ euros. Por otra parte, el organizador de la lotería, con este premio y este precio por boleto, y siempre que venda todos los números, no gana ni pierde nada.

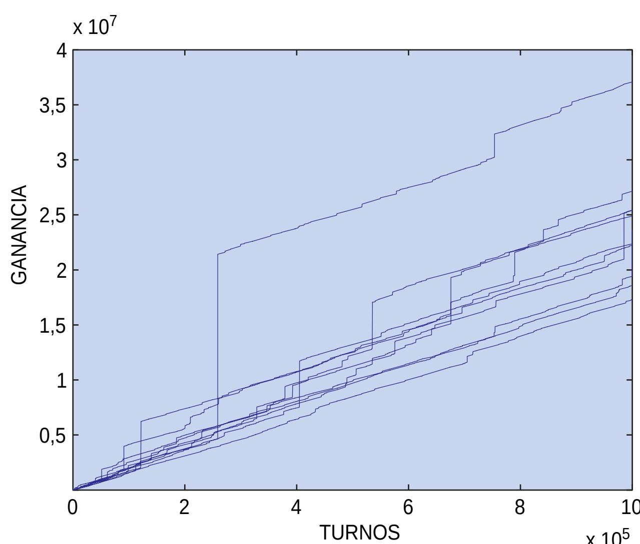
Si aplicamos este criterio al juego de San Petersburgo, nos encontramos con un serio problema. La probabilidad de que la primera cara salga en la tirada n-ésima es $(1/2)^n$, ya que, para que esto ocurra, debe salir cruz en las $n-1$ primeras tiradas y cara en la siguiente. En este caso la ganancia es 2^n. El valor medio de la ganancia es entonces:

$$G = \frac{2}{2} + \frac{4}{4} + \frac{8}{8} + \frac{16}{16} + \ldots$$

que es claramente infinito. Por tanto, la cuota de entrada debería ser infinita. En otras palabras, si yo le ofrezco entrar en el juego con una cuota de, digamos, un millón de euros, usted debería aceptar, porque la ganancia media en el juego, que es infinita, supera esa y cualquier otra cantidad. Sin embargo, nadie en su sano juicio aceptaría semejante trato. Esta es la paradoja de San Petersburgo: el sentido común nos dice que el valor medio de la ganancia no determina la cuota de entrada aceptable. ¿Cómo determinamos entonces dicha cuota?

El problema fundamental del juego de San Petersburgo es que proporciona premios muy cuantiosos con probabilidad extremadamente pequeña. Por ejemplo, si la primera cara aparece en la tirada décima, la ganancia es de 1024 euros, y esto ocurre con una probabilidad de 1 entre 1024. Las ganancias crecen exponencialmente mientras que las probabilidades decrecen también exponencialmente, siendo siempre el valor medio de cada posible premio igual a un euro.

En la figura 1 podemos ver diez "partidas" del juego de San Petersburgo, que constan de un millón de turnos del juego, que acaban cuando sale cara, con la ganancia correspondiente. He dibujado las ganancias acumuladas en función del número de turnos. La mayoría de las partidas acaban con una ganancia similar, en torno a los 20 millones, salvo una de ellas, en las que ha habido uno de esos eventos raros, en un turno un poco anterior al 300.000. En ese turno, salió cruz durante 23 tiradas seguidas y cara en la vigésimo cuarta, con lo que la ganancia del jugador fue de más de 16 millones de euros. La probabilidad de que esto ocurra es de una entre 16 millones. Sin embargo, en un millón de turnos, esto puede ocurrir con una probabilidad superior al 5 %. Por eso, no es sorprendente que en diez partidas de un millón de turnos cada una, hayamos sido testigos de un evento tan poco probable. En el resto de las partidas también hay turnos con grandes ganancias: varios de ellos son saltos de unos 4 millones de euros y hay numerosos saltos de aproximadamente 2 millones y un millón de euros (recordemos que los saltos son siempre potencias de dos, pero 2^{20} es 1.048.576, número muy cercano al millón de euros). Cuantos más turnos juguemos, aparecerán saltos cada vez mayores. Eso



1. Diez partidas del juego de San Petersburgo, cada una de ellas de un millón de turnos.

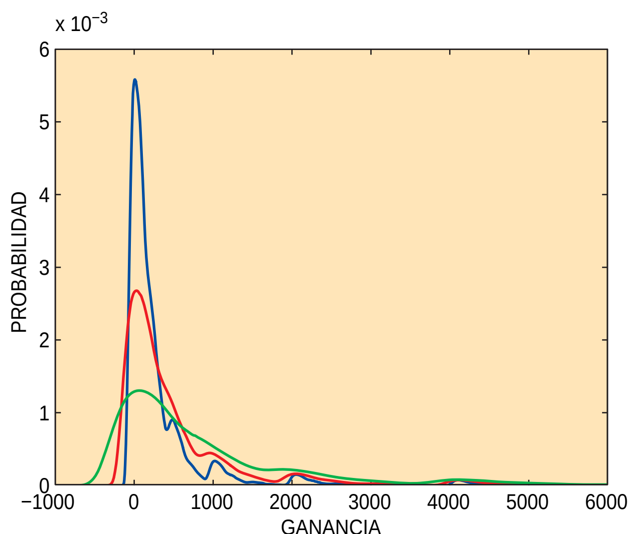
es lo que hace que el valor medio de la ganancia sea infinito. Pero si vamos a jugar sólo unas decenas de turnos, parece en principio absurdo que paguemos una cuota elevada por turno debido a eventos prácticamente imposibles. La paradoja sigue por tanto en pie.

Como decíamos al principio, la literatura sobre la paradoja de San Petersburgo es muy amplia y aún hoy en día se discuten posibles soluciones. Estos análisis y soluciones pueden clasificarse en dos grandes grupos: los que abordan el problema puramente matemático de un juego con ganancia media infinita y los que tratan de analizar cómo opera el "sentido común" y cómo valoramos el riesgo en un sorteo como el de San Petersburgo. Los trabajos que siguen esta última estrategia acaban casi siempre enfrentándose a cuestiones de índole psicológica. Uno y otro enfoque se corresponden con el problema al que se enfrenta el organizador y el jugador del sorteo, respectivamente.

Pongámonos en el papel del organizador de un sorteo de San Petersburgo. Somos dueños de un gran casino que quiere introducir este juego: ¿qué cuota de entrada deberíamos cobrar para hacer frente al pago de los premios? La diferencia entre el casino y el jugador es que el primero juega un gran número de veces y puede confiar en la estadística. Sin embargo, en el caso del juego de San Petersburgo, cuantos más turnos jugamos, más posibilidades hay de observar grandes saltos, como los de la figura 1. Varios matemáticos han estudiado la distribución de probabilidad de la ganancia del jugador después de un gran número N de turnos. Estas distribuciones están concentradas en torno a una cantidad que obviamente crece con N, pero que no es proporcional al número de turnos N, sino que vale $N \log_2 N$.

Por tanto, si el casino quiere recuperar el dinero que paga a los jugadores, tendrá que recaudar, después de N turnos, una cantidad $N \log_2 N$. De hecho, tendría que recaudar una cantidad algo mayor. En la figura 2 se muestra la distribución de probabilidad de las ganancias totales a las que he restado $N \log_2 N$, para N = 50, 100 y 200 turnos. Como vemos en la figura, las distribuciones están concentradas en torno a cero, como cabría esperar en cualquier sorteo justo, aunque la parte de ganancias positivas para el jugador es ligeramente superior a la de ganancias negativas. Podríamos corregir este sesgo aumentando ligeramente la cuota.

En cualquier caso, este resultado nos indica que la recaudación total no puede ser proporcional al número de turnos. Por el contrario, el casino debe cobrar *en cada turno* una cantidad ligeramente superior a $\log_2 N$, para así poder cubrir las pérdidas, siendo N el número *total* de turnos que está dispuesto a jugar con *todos* sus clientes. Esta solución a la paradoja, propuesta por Feller en 1968, puede que sea una buena indicación de qué debe hacer el casino, pero, al cliente que quiere jugar al sorteo de San Petersburgo, le parecerá absurdo que le cobren por turnos en los que él no va a jugar. Incluso con un solo cliente, una solución en donde la cuota dependa del número total de turnos es bastante peculiar. ¿Qué pasa si el casino y el cliente acuerdan prolongar la partida un millón de turnos más?



2. Distribución de probabilidad de la ganancia del jugador después de 50 (*curva azul*), 100 (*curva roja*) y 200 (*curva verde*) turnos, suponiendo una cuota total por participar $c = N \log_2 N$.

En 1985, el matemático sueco Martin Löf refinó el resultado de Feller, hallando la siguiente aproximación para la ganancia total G en N turnos:

$$\text{Prob}\left(\frac{G - N\log_2 N}{N} > x\right) \approx \frac{1}{x}$$

que es aceptable para valores de x superiores a 30. Esta fórmula se puede utilizar para encontrar cuotas más precisas que la dada por Feller. Por ejemplo, si el casino se contenta con que la probabilidad de perder dinero sea $1/x$ = 0,001, tendrá que cobrar una cuota total $xN + N \log_2 N$, y una cuota por turno de $x + \log_2 N = 1000 + \log_2 N$ euros, que es superior a la sugerida por Feller en 1000 euros. Martin Löf señala que el término de Feller $\log_2 N$ es comparable con los 1000 euros sólo a partir de números N muy grandes. Por ejemplo, para un millón de turnos, dicho término es ligeramente inferior a 20. Por tanto, la cuota que se deduce de su análisis es prácticamente independiente de N.

Los resultados de Martin Löf son interesantes, pero no se pueden considerar una solución de la paradoja, puesto que nadie estaría dispuesto a pagar 1000 euros para participar en el juego de San Petersburgo. La razón es que la distribución de las ganancias tras un gran número de turnos es relevante para el casino, pero no para el jugador que sólo va a jugar unas pocas veces. En este caso, es difícil valorar los premios muy improbables y no hay un consenso acerca de cuál es la cuota de entrada que el jugador debería aceptar. El mes que viene analizaremos la paradoja desde esta perspectiva.

Mark Fischetti

BATERIAS DE LITIO

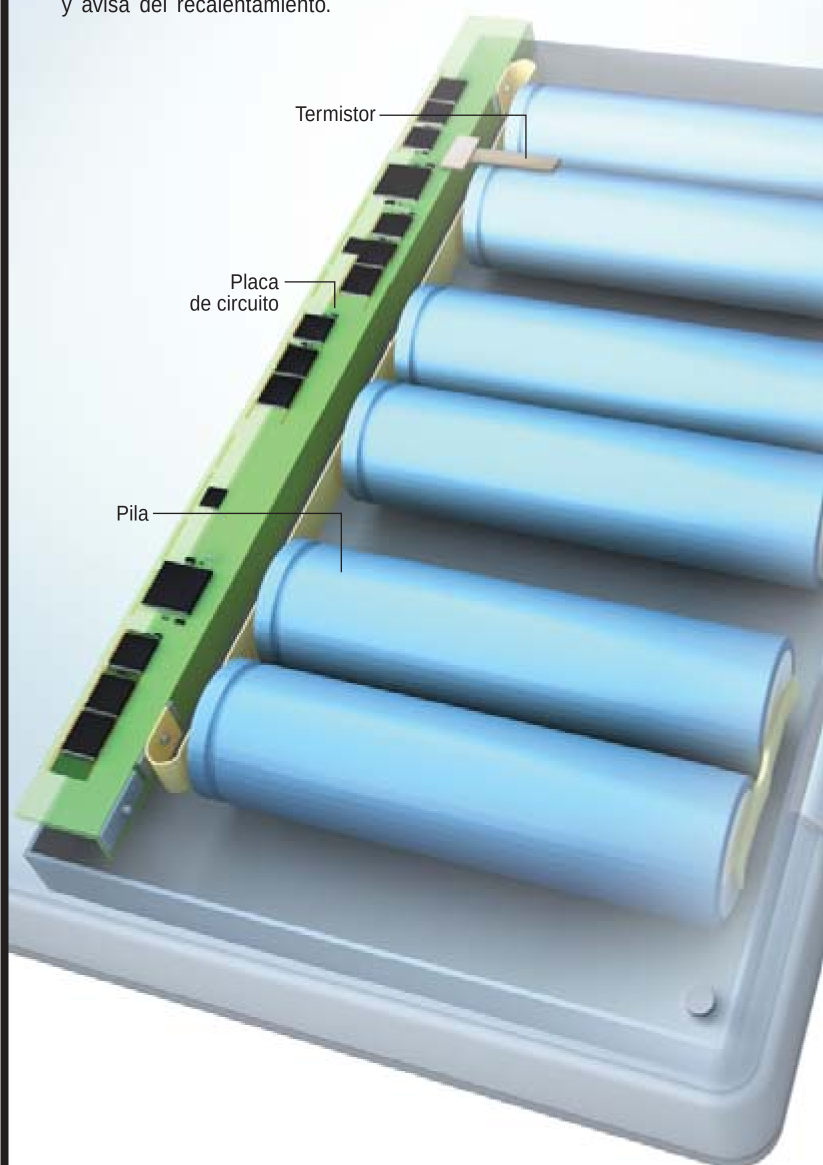
Un producto crítico

Varias retiradas del mercado de grandes cantidades de baterías de litio usadas en ordenadores portátiles han planteado dudas acerca de cómo tales acumuladores pueden recalentarse hasta el punto de estallar en llamas. Igualmente válida es la pregunta de por qué no se producen más accidentes entre los centenares de millones de baterías que se venden al año.

Las pilas de litio se basan en varios procesos químicos. Las recargables, incluidas las de cámaras y teléfonos celulares, suelen emplear cátodos de óxido de litio-cobalto y ánodos de grafito. Aunque, según Gerbrand Ceder, profesor de ciencia de materiales en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, ese diseño entraña cierto riesgo, una manufactura cuidadosa y unos dispositivos de seguridad bien integrados han limitado los accidentes. Aun así, los fabricantes de baterías han venido apurando el estado de carga de las baterías ante las exigencias de mayor tiempo de funcionamiento por parte de los fabricantes de electrónica, por lo que ahora hay menos margen para el error. Mediante el aumento de la concentración de iones, los fabricantes han cuadruplicado la capacidad de almacenamiento de energía desde la comercialización iniciada en 1991.

Lo que empezó siendo un artículo selecto constituye hoy un producto de consumo común. El afán por aumentar la carga y, pese a ello, rebajar el precio estimuló a los fabricantes a asumir mayores riesgos, explica Christina Lampe-Onnerud, cofundadora de Boston-Power, que en 2005 comenzó a producir nuevos tipos de baterías de litio. Los dispositivos de seguridad de hace cinco años bastaban para el contenido energético de aquellas pilas, pero el aumento de la capacidad de carga dejará atrás esos mecanismos.

Existen ya prototipos de nuevos dispositivos de seguridad y diseños que producen más corriente con menos calor. En la opinión de Ceder, la intensa actividad en la floreciente industria de los vehículos eléctricos e híbridos desarrollará materiales catódicos menos peligrosos que se abrirán paso en la industria de la electrónica de consumo. Para los cátodos, quizás aparezcan óxidos metálicos nuevos; puede que los ánodos abandonen el grafito en favor del silicio. Pero, señala Lampe-Onnerud, mientras esperamos la llegada de estos materiales, la clave de un funcionamiento seguro reside en un diseño más imaginativo. La industria ha estado exigiendo más y más de un mismo concepto químico para una amplísima gama de aplicaciones. Ya es hora de fabricar baterías basadas cada una en un sistema adecuado para cada aplicación.



1. LAS BATERIAS PARA PORTATILES constan de parejas de pilas de litio conectadas en serie. Un sistema de circuitos eléctricos controla la intensidad de la corriente y la recarga; un termistor mide la temperatura y avisa del recalentamiento.

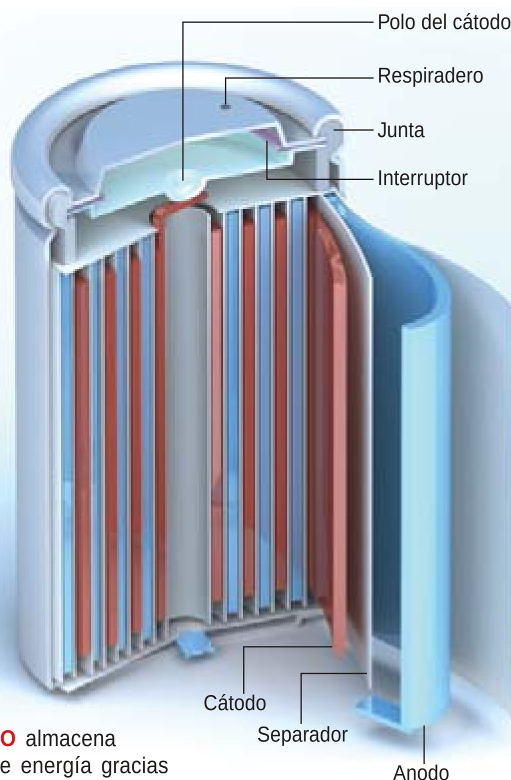
BRYAN CHRISTIE DESIGN (*corte*); JEN CHRISTIANSEN (*esquemas*); EMILY HARRISON (*fotografía*)

¿SABIA USTED QUE...?

➤ **PROTEJASE:** Expuesto a la más mínima traza de humedad (como la que contiene la atmósfera) el litio arde con violencia. No trate nunca de abrir una batería apalancándola. No apague una batería en llamas con agua, pues ésta las aviva; use un extintor de base química. La carcasa de la pila puede calentarse peligrosamente o prenderse fuego si la pila se recalienta mucho (cosa más que probable si está cargada al máximo); por tanto, no deje esos productos sobre superficies calientes (un alféizar encima de un radiador) o al sol, ni especialmente dentro de un vehículo. Tampoco puentee los bornes de una pila.

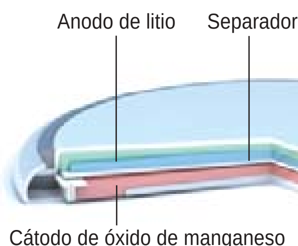
➤ **LA SENDA DE TESLA:** Martin Eberhard, empresario de Silicon Valley, inauguró Tesla Motors en 2004. El verano de 2006 presentó el Tesla Roadster: el primer prototipo de vehículo totalmente eléctrico que emplea baterías de litio, 6831 en total. Pasa de cero a 95 kilómetros por hora en cuatro segundos; su autonomía entre cargas es de 400 kilómetros. Afirma la empresa que los controladores a cargo de cada pila cortan el paso de corriente en todas ellas en un instante, aun cuando una pila se prenda fuego. Otros fabricantes están experimentando con óxido de litio-níquel-manganeso.

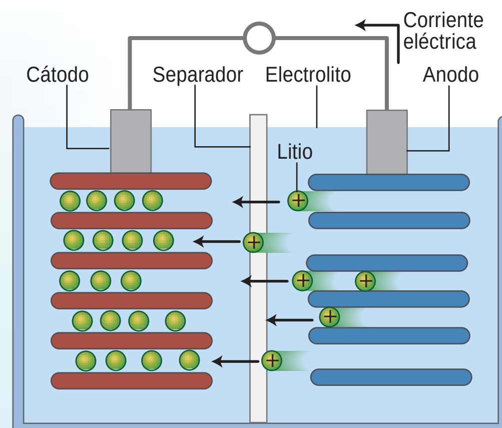
➤ **DURACION:** Todas las baterías se degradan, pero las pilas de litio se corroen más rápido cuanto mayores son la carga y la temperatura. Una batería de portátil media que se mantenga a plena carga a 25 grados Celsius perderá irreversiblemente un 20 por ciento de su capacidad al año. Puede alargarse la vida de las pilas guardándolas a media carga en el frigorífico.



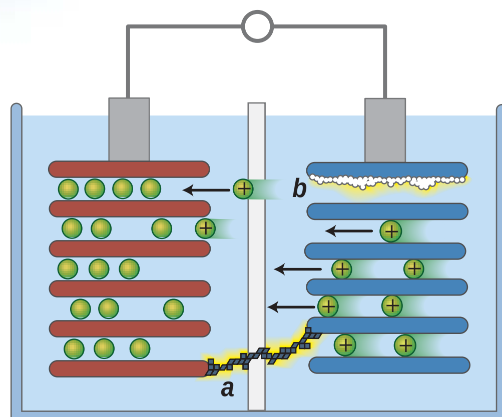
2. LA PILA DE LITIO almacena una gran cantidad de energía gracias a las láminas catódicas y anódicas, aisladas por separadores, que forman paquetes arrollados y empapados de electrolito. Para evitar el recalentamiento, un respiradero facilita la descarga del gas que pueda generarse en una reacción química errática; si el gas se forma con excesiva prontitud, la junta se funde y se inactiva la pila. Si ésta se cortocircuita externamente, la misma rapidez de la descarga activa el interruptor de corriente, lo que desconecta la pila.

3. EN UNA PILA DE BOTON la corriente la forman los iones que atraviesan un separador con electrolito. La corriente es irreversible; la pila, irrecargable.





4. EN LAS BATERIAS la energía es de origen químico. El litio contenido en el ánodo se ioniza en el electrolito (una sal de litio) y migra al cátodo a través del separador de plástico poroso. En la reacción se liberan electrones, que generan una corriente externa. La aplicación de un voltaje externo al cátodo impulsa a los electrones de vuelta al ánodo; así, la pila se recarga.



5. SE PRODUCE RECALENTAMIENTO si las partículas generadas por algún defecto de fabricación (principal sospecha en las últimas retiradas de baterías del mercado) tienden un puente entre el cátodo y el ánodo a través del separador (*a*); esa conexión deriva la corriente, lo que crea un calor excesivo. Este degrada los materiales y se inicia una reacción descontrolada; se genera tal cantidad de calor, que los componentes empiezan a quemarse. También se produce un corto por acumulación de litio metálico procedente de reacciones químicas indeseadas (*b*).

LIBROS

Gen

Factor egoísta

RECONCEIVING THE GENE. SEYMOUR BENZER'S ADVENTURES IN PHAGE GENETICS, por Frederic Lawrence Holmes. Edición preparada por William C. Summers. Yale University Press; New Haven, 2006.

GENES IN CONFLICT: THE BIOLOGY OF SELFISH GENETIC ELEMENTS, por Austin Burt y Robert Trivers. Belknap Press of Harvard University Press; Cambridge, 2006.

WON FOR ALL. HOW THE *DROSOPHILA* GENOME WAS SEQUENCED, por Michael Ashburner. Cold Spring Harbor Laboratory Press; Cold Spring Harbor, 2006.

Entre los logros de la técnica brilla la capacidad alcanzada de determinar la secuencia completa de los genomas de organismos dispares en naturaleza, tamaño y complejidad. De un patógeno bacteriano al hombre. El hito lo coronaron, a mediados de los años setenta del siglo pasado, Fred Sanger, de Cambridge, y Wally Gilbert, de Harvard. Desde hace un decenio, merced al trabajo de Lee Hood, se trabaja ya sobre secuenciación automática (*Won for All*).

En el intervalo de mayo de 1998 a marzo de 2000, quedó terminada la secuencia nucleotídica del genoma de *Drosophila melanogaster*, fruto del trabajo conjunto de una empresa privada, Celera Genomics, y una institución pública, la Universidad de Berkeley. Craig Venter, de Celera, y Gerry Rubin, de Berkeley, comprendieron de inmediato el interés biológico de la mosca y su valor de ensayo para el proyectado genoma humano, cuyo primer borrador se publicó en febrero de 2001. Hoy se cuentan por centenares los genomas secuenciados, sobre todo de microorganismos.

Drosophila se erigió en organismo ideal para establecer la función de los genes mucho antes del advenimiento de la genómica funcional. Hoy se conocen ya numerosos genes mutados de la mosca y cabe esperar que pronto contemos con series alélicas de mutaciones en todos los genes. Cuando se aísla una nueva mutación que afecta a un proceso de interés, se cartografía su región cromosómica.

La historia de articulación de la genética comienza en los primeros decenios del siglo XX, tras el redescubrimiento de las leyes de Gregor Mendel (*Reconceiving the Gene*). En 1909, Thomas Hunt Morgan publicaba un artículo sobre el significado de los "factores" en la interpretación mendeliana de la herencia; protestaba contra la fácil asimilación de los "hipotéticos" factores mendelianos con los "caracteres reales". Ese mismo año, Wilhelm Johannsen, quien había cultivado líneas puras de *Phaseolus*, llegó a la conclusión de que el concepto de carácter unidad no expresaba la relación compleja entre rasgos observables de las plantas y unidades fisiológicas. Johannsen escogió el término de Hugo de Vries *pangene*, pero le eliminó la primera sílaba para liberarlo de asociaciones con teorías del pasado. De manera gradual, la palabra *gen* fue sustituyendo a *factor* o *carácter unidad* en la preferencia de los genéticos.

La conversión mendeliana de Morgan se produjo en 1910 a raíz de un hallazgo casual: en un cultivo de *Drosophila* que duraba en torno a un año y donde se sucedieron numerosas generaciones, apareció un macho con ojos blancos. Las moscas normales presentan ojos de un rojo intenso. El cruzamiento de este macho "mutante" con sus hermanas produjo una descendencia de ojos rojos, pero en la generación descendiente del cruzamiento de híbridos aparecieron machos y hembras de ojos rojos y machos de ojos blancos. Morgan postuló que el macho de ojos blancos portaba el "factor de ojos blancos" y era heterocigoto para el "factor sexual". El resultado, reconocía, era mendeliano: había tres rojos y uno blanco.

Se mostró cauteloso con la utilización del término factor, pero no remilgado ante la adopción de la palabra *mutación* para designar la mosca nacida con un carácter distinto de sus progenitores. Este vocablo había sido acuñado por de Vries para denotar el aparente origen repentino de una nueva especie de dondiego de noche en una sola generación. Morgan asociaba, sin embargo, las mutaciones con modificaciones discontinuas y pequeñas que surgían en el seno de una especie o variedad preexistentes. Con su joven equipo de la "sala de las moscas" de la Universidad de Columbia descubrió numerosas mutaciones espontáneas, incluidas cinco relacionadas con el color de ojos y nueve modificaciones alares. Algunas de esas mutaciones se hallaban ligadas al sexo. Las conexiones un tanto vagas entre factores, cromosomas y ligamiento sexual se fueron aclarando cuando cruzó moscas que diferían en dos caracteres asociados al sexo (ojos blancos con alas largas y ojos rojos con alas rudimentarias).

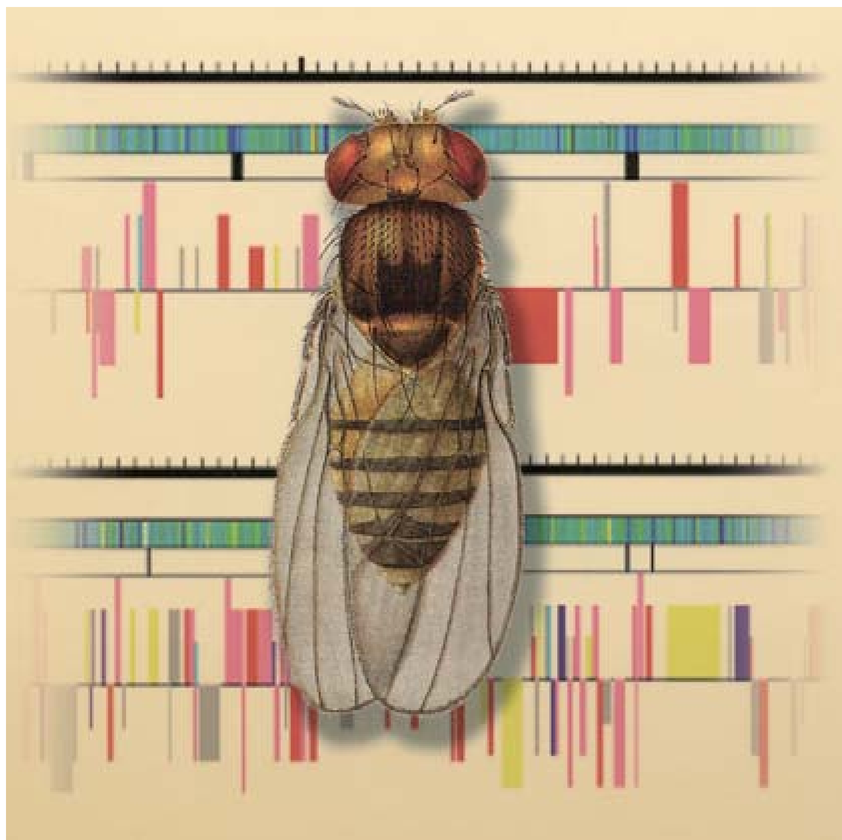
A partir de sus experimentos con caracteres asociados al sexo, Morgan abordó en 1912 la constitución del cromosoma. Todo carácter asociado al sexo debía hallarse en el cromosoma sexual y la asociación hereditaria de dos caracteres obedecía a la proximidad, en un mismo cromosoma, de las sustancias químicas (factores) que producían los caracteres en cuestión. Se hallaba convencido de que los factores eran partículas materiales ínsitas en los cromosomas. Alfred H. Sturtevant, uno de sus discípulos junto con Hermann Muller y Calvin Bridges, propuso que la frecuencia relativa con la que dos factores se separaban reflejaba su mutua distancia

en el cromosoma. Sturtevant estudió la frecuencia del intercambio entre cromosomas homólogos, lo que él llamó "sobrecruzamiento" de factores ligados al sexo. Lo que para Morgan era asociación, para Sturtevant era ligamiento. Sturtevant, Muller y Bridges fueron poco a poco abandonando el uso del término *factor* para adoptar el de *gen* de Johannsen.

En 1915 apareció el libro *The Mechanism of Mendelian Heredity*, síntesis de la genética morganiana o clásica. Aunque no se identifican las partes escritas por cada miembro del grupo, resulta manifiesto que se llegó a una solución de compromiso sobre el lenguaje a adoptar.

En 1916 Muller publicó una serie de cuatro artículos sobre "The Mechanism of Crossing Over". Introducía sus propios experimentos en los que había creado líneas de *Drosophila* que contenían nueve mutantes sobre el cromosoma X y otras líneas con siete mutantes en el cromosoma II. Con tales cepas, demostró que los sobrecruzamientos, por sí solos, separaban grupos enteros de factores, confirmando la hipótesis de que los factores se disponían en secuencia lineal sobre el cromosoma. A finales de 1926 comenzó a aplicar dosis de rayos X a sus cepas mutantes, irradiando unas veces los machos y otras las hembras. En pocos meses obtuvo setecientos mutantes. A los genes, dispuestos en secuencia lineal, no los consideró cuentas de un rosario, sino eslabones de una cadena. Comparó, además, las dimensiones del gen con las dimensiones de una molécula de proteína. Y, con la opinión compartida por los genéticos, dio por supuesto que las proteínas constituían los candidatos más firmes para convertirse en las "moléculas orgánicas" componentes de los genes.

Para entonces, los drosofilistas de primera y segunda generación habían superado el interés en la cartografía de los cuatro cromosomas de la mosca del vinagre. Ante la Academia de Ciencias de la URSS, en marzo de 1936, Muller realizó una apasionada defensa de los físicos que se interesaban por los problemas que rodeaban a los genes, donde suponía se encerraba el arcano de la vida. Y acotó tres problemas principales: la fuerza de autoatracción de los genes, distinta de la fuerza de absorción familiar para los físicos; la capacidad de autosíntesis, que convierte al gen en un modelador de la copia de sí mismo, y, por fin, los cambios o mutaciones génicas. La combinación de los métodos de la genética y la física había mostrado que las mutaciones producidas por irradiaciones de alta frecuencia obedecían a ionizaciones individuales.



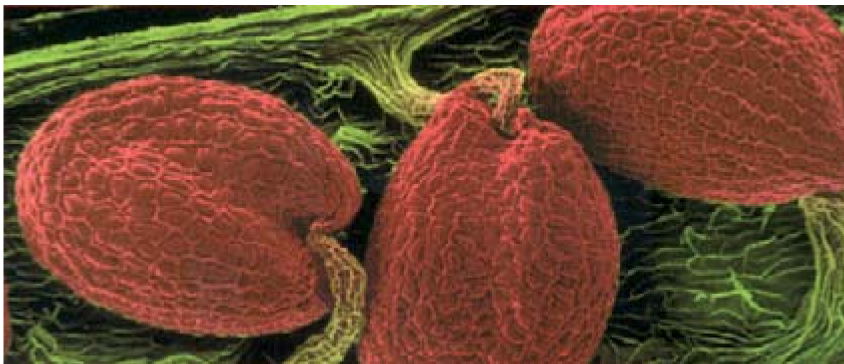
Drosophila melanogaster, modelo de la investigación genética a lo largo de un siglo.

Muller sabía del trabajo de dos físicos de Berlín sobre mutaciones génicas inducidas por irradiación. Cuatro años antes, había pasado varios meses en Berlín colaborando con N. V. Timoféeff-Resovsky sobre los cambios genéticos causados por radiación de diversas longitudes de onda. Una vez que Muller abandonó Berlín por la Unión Soviética en 1933, Timoféeff contó con la ayuda de Karl G. Zimmer, interesado en la irradiación de organismos con dosis creciente, contrapuesta con los agentes químicos. En su tiempo de Berlín, Muller conoció también a Max Delbrück, joven físico teórico protegido de Niels Bohr. Una conferencia de éste sobre el principio de complementariedad le despertó el interés por la biología. Poco después Delbrück entró en contacto con Timoféeff y Zimmer.

Delbrück pensó en un comienzo que podía caracterizar los genes, sus mutaciones y su replicación a través de métodos físicos. En 1935 Timoféeff, Zimmer y Delbrück publicaron un artículo conjunto: "The Nature of the Mutation and Structure of the Gene". El artículo constaba de cuatro partes: en la primera, Timoféeff ponderaba algunos hechos tomados de las investigaciones sobre mutaciones; Zimmer abordaba en la segunda la teoría del pulso de radiación y los orígenes de las mutaciones; Delbrück se reservó la tercera para exponer un modelo atómico de la mutación génica; el título coincidía con lo estudiado en conjunto por los tres en la parte cuarta: "una teoría de la mutación y la estructura génicas".

Delbrück se planteaba de entrada la oportunidad de trasladar el debate de la física atómica a la genética. A diferencia de la química, las magnitudes sobre las que se apoya la genética no se expresan en unidades

absolutas de masa y, por ende, no dependen de magnitudes físicas más fundamentales. El desarrollo de la citogenética había permitido calcular el tamaño de un gen, equiparable al de una macromolécula. Muchos sospechaban que el gen era una suerte de molécula cuya estructura específica no se conocía. La identificación del gen con una molécula se apoyaba en una razón de peso: su estabilidad, pues permanecía inalterado en los ensayos de hibridación. Delbrück deduce que las mutaciones espontáneas eran reordenaciones instadas por la energía térmica, mientras que las mutaciones inducidas por radiación estaban causadas por pares iónicos excitados por radiación. Por entonces creía que los virus encerraban la clave de la vida.



Al no tener futuro en Alemania, Delbrück se trasladó a California en octubre de 1937 para estudiar genética de *Drosophila* con el grupo de Morgan. Pese a sus esfuerzos iniciales por familiarizarse con los problemas de ligamiento, se convenció pronto de que la mosca le resultaba demasiado compleja para alcanzar su interés real: desentrañar la replicación de los genes. Investigaba allí Emory Ellis, dedicado a los "virus filtrables"; algunos de ellos, como el del sarcoma de Rous, causan tumores. Cuando Delbrück se le acercó estaba estudiando el ciclo biológico de un bacteriófago obtenido de una siembra que infectaba la bacteria intestinal común *Escherichia coli*. Cautivado por la sencillez de los experimentos de fagos, no tardó en formar equipo con Ellis.

Analizaron las tres etapas: infección, desarrollo y explosión. Sometieron a prueba la idea de que bastaba una sola partícula de fago para originar una placa. Luego, Delbrück inició su propia línea en solitario. Al estudiar la adsorción del fago en la bacteria huésped, descubrió que la tasa dependía del estado fisiológico de la bacteria; en condiciones óptimas, la tasa multiplicaba sesenta veces la cuantía de la tasa en condiciones pobres. En la lisis observada al microscopio, la bacteria parecía esfumarse al liberarse las partículas víricas.

En 1940, Delbrück dictó una conferencia sobre radiación y mecanismo de la herencia; pasaba revista a los experimentos apoyados en radiación con rayos X y otras fuentes de radiación ionizante, así como luz ultravioleta, lo mismo en microorganismos que en organismos superiores. A diferencia de su trabajo de 1935 con Timoféeff y Zimmer, no atribuyó las mutaciones génicas a cambios de estado cuánticos; apelaba ahora a las categorías químicas de cambio. En 1941 expuso una teoría autocatalítica de la síntesis de polipéptidos y su aplicación al problema de la reproducción cromosómica. Resumió por entonces también sus investigaciones de cuatro años en torno a los virus bacterianos o bacteriófagos. Insistía en la importancia de la base bioquímica de la relación específica del fago con su huésped y el desarrollo del fago.

Con Salvador Luria se aprestó a desentrañar qué sucedía desde el instante de la penetración del fago en la bacteria hasta el momento de la liberación de la progenie. En el camino descubrieron el fenómeno de "interferencia": tomaron dos tipos de bacteriófagos que, aunque divergentes en tamaño y otras características, compartían la misma capacidad de infectar a un huésped común, la cepa B de *E. coli*. Sometieron los dos virus a ensayo por separado y juntos en "infecciones mixtas". En todos los ensayos, las infecciones mixtas suprimían el desarrollo de un virus, mientras que el otro proliferaba con normalidad. Delbrück y los genéticos planteaban a los bioquímicos tres tipos de problemas: ¿De qué constan los genes? ¿Cómo se reproducen? ¿Cuál es su mecanismo de operación? Para Delbrück el gen venía a ser una suerte de enzima que catalizaba una fase de la cadena de reacción.

Luria y Delbrück, con la adición de Hershey, realizaron en 1945 contribuciones significativas al descubrimiento de las primeras mutaciones de bacteriófagos. Mas para Delbrück y Luria la existencia de fagos mutantes y el hallazgo de mutaciones bacterianas seguían subordinados a la elucidación del ciclo reproductor del bacteriófago. Hershey, en cambio, vio en esos avances el desarrollo de los fundamentos de una genética vírica, en el mismo plano que la genética clásica.

Desde 1945 Delbrück se erigió en líder indiscutido de la investigación sobre el fago. Ese mismo año Erwin Schrödinger publicó un opúsculo de 90 páginas, *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. Para el mecanismo de la herencia Schrödinger se basó en los manuales de Cyrill D. Darlington, Edmund W. Sinnott y Leslie C. Dunn y J. B. S. Haldane. Cuando llegó a las mutaciones inducidas por rayos X, se apoyó en los trabajos de Timoféeff-Resovsky. Para Schrödinger, el cuadro general del gen y la mutación se debía a Delbrück. De acuerdo con Schrödinger, el "modelo de Delbrück" mostraba que el gen era una molécula cuya estabilidad no podía explicarse por la física clásica, aunque era fácilmente inteligible en términos de los estados de una molécula permitidos por la mecánica cuántica y cuyas mutaciones constituían cambios de configuración posibilitados por "saltos cuánticos" de un estado a otro.

La genética clásica convergía con la biología molecular. Y Seymour Benzer, estudioso de la estructura fina del mapa genético de un virus bacteriano, le dio el impulso decisivo (*Reconceiving the Gene*). Benzer, nacido en 1921, trabajaba en el departamento de física de la Universidad de Purdue sobre las propiedades semiconductoras del germanio cuan-

do en 1946 cayó en sus manos el librito de Schrödinger *What is Life*? Quedó entusiasmado por el modelo de gen de Delbrück. La idea de que una mutación consistía en un cambio de energía que elevaba la molécula del gen a un estado metaestable, a partir del cual podía revertir a su estado original, le parecía guardar una relación directa con los cambios de niveles de energía que él había estudiado en los semiconductores. ¿Podría él aplicar sus conocimientos de física a esas cuestiones centrales no resueltas?

En junio de 1948, Benzer acudió al cursillo estival de Cold Spring Harbor sobre fagos. Tuvo por compañera de banco a Margaret Lieb, quien le enseñó una técnica clave: saber sostener una pipeta y una torunda de algodón con una mano, mientras dejaba libre la otra para sostener el tubo de ensayo. Tras aprender a distinguir los siete tipos de fagos preferidos por los investigadores, los alumnos preparaban cultivos de la cepa B de *Escherichia coli* en tubos, observando que la turbidez del cultivo adquiría intensidad a las 10^7 bacterias/cc. Al infectar las bacterias con cada tipo de fago, se familiarizaban con las fases de la reproducción del fago: adsorción, penetración, multiplicación y lisis. No había prueba visible de que la partícula inicial penetrara. Tras un intervalo variable de latencia, en el que se suponía que los fagos estaban multiplicándose, la destrucción o lisis de las bacterias liberaba entre cien y quinientas partículas de fagos, un proceso que podía seguirse en el tiempo a través de una curva de turbidez decreciente del medio líquido de cultivo.

Con el tiempo, Benzer se enroló en el grupo de biofísicos de Delbrück, integrado por una mayoría de renegados: tres físicos, un químico físico, dos médicos y un bacteriólogo. Constituían un equipo internacional: alemanes (Delbrück, Weidel y Stent), un francés (Wollman), un suizo (Weigle), un italiano (Dulbecco) y un norteamericano (Benzer). Entre 1954 y 1961 desarrolló su investigación sistemática capital: cartografiar la estructura fina de la región rII del genoma del fago T4, un virus bacteriano. La naturaleza del gen se reconfiguró en términos moleculares.



Margaret Lieb enseñando a Seymour Benzer una técnica clave: saber sostener una pipeta y una torunda de algodón con una mano, mientras dejaba libre la otra para sostener el tubo de ensayo.

En 1957, aportó pruebas del carácter lineal del mapa genético, a lo largo de las dimensiones de los nucleótidos según el modelo de Watson-Crick. La naturaleza lineal del mapa genético, en sus dimensiones moleculares, corroboraba la hipótesis según la cual la secuencia de pares de bases de un ácido nucleico constituye un código que especifica la secuencia de aminoácidos de una proteína. La confirmación de que los genes pueden identificase con secuencias de nucleótidos de ADN proporcionó la base química, largo tiempo buscada por los genéticos clásicos, para conferir un significado tangible a lo que había sido una unidad abstracta en el mapa genético.

A comienzos de los años setenta, Robert Trivers publicó varios artículos sobre la evolución genética del comportamiento social. Su enfoque, centrado en la selección, carecía del cedazo matemático que conferían, aducían los críticos, las ecuaciones estándar sobre cambios en la frecuencia de alelos. Con Austin Burt viene ocupándose, desde hace diez años, de los elementos genéticos egoístas: segmentos de ADN —de las levaduras a los humanos— que pugnan por asegurar su propia replicación a expensas del organismo huésped (*Genes in conflict*).

En el curso de la evolución, la mayoría de los genes sobreviven y se difunden por la población porque aumentan la capacidad que tienen sus portadores (sus parientes cercanos) de sobrevivir y reproducirse. Pero algunos genes se difunden pese a ser dañinos para el organismo que les aloja, al distorsionar el proceso de transmisión hereditaria o modificar la forma en que el huésped se comporta con sus parientes.

En un mismo macho contemplamos genes de intereses encontrados: genes que quieren que se produzca cantidad abundante de esperma sano y genes que quieren que la mitad del esperma sea defectuoso. En una misma hembra, genes que desean la nutrición para todos los embriones y genes que buscan el aborto de la mitad de ellos. En un mismo feto, hay genes partidarios de un desarrollo presto, otros de un desarrollo lento e incluso unos terceros que proponen una velocidad media. Unos genes quieren que el feto sea macho; otros, hembra. ¿Cómo debería el organismo gestionar su ADN? Unos genes se esfuerzan en proteger a los cromosomas, mientras que otros desean su disgregación; existen genes que se empeñan en activar un gen particular, en tanto que otros buscan silenciarlo. Tales genes ansían, a la postre, su propio beneficio. Son egoístas.

De dos mecanismos evolutivos se sirve una secuencia de ADN para

La imagen en la ciencia

ENVISIONING SCIENCE. THE DESIGN AND CRAFT OF THE SCIENCE IMAGE, por Felice Frankel. The MIT Press; Cambridge, 2002.

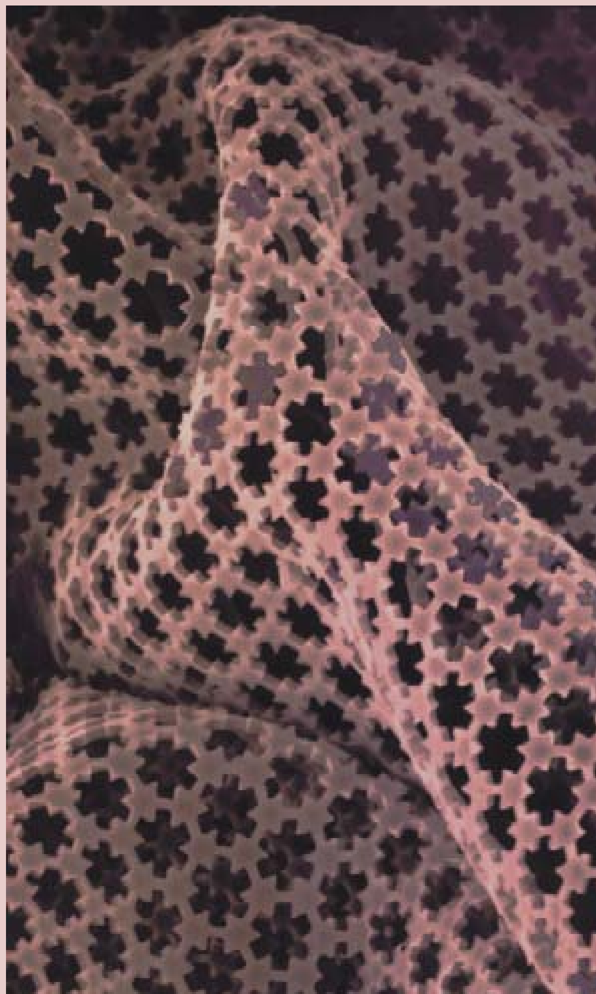
No es *Envisioning Science* un libro de divulgación, aunque su lectura pueda resultar interesante a mucha gente. Antes bien, está escrito pensando en los laboratorios de investigación. Es obvio que los resultados de toda investigación, sea científica o técnica, deben ser comunicados por cauces internos de la misma comunidad investigadora. Al extenderla al público en general, una componente importante es de naturaleza visual. Este libro se propone enseñar las técnicas para hacer más atractiva esa componente visual, que puede estar formada por fotografías, esquemas, diagramas e imágenes de cualquier índole.

La autora, fotógrafa científica profesional, pone a disposición del lector su experiencia en la toma de imágenes científicas y de ingeniería para fomentar entre los profesionales de la investigación el uso de las prácticas que expone en las páginas del texto. Y ello por razones de peso. Primero y principal, la investigación es cada vez más interdisciplinar y todo lo que favorezca la claridad en los intercambios entre las distintas ramas de la ciencia y la técnica debe ser tenido como beneficioso.

Por otra parte, al obligarse a elaborar con ciertos cuidados la componente visual de los resultados de su trabajo, es posible que el investigador perciba ese trabajo desde nuevas perspectivas y vislumbre posibilidades inéditas. Tampoco hay que descuidar el hecho de que unas imágenes atractivas y fácilmente comprensibles para el público pueden hacer que éste se sienta más próximo a la ciencia y ello redunde en más apoyos sociales a las labores investigadoras.

Envisioning Science no trata de cómo hacer ciencia, sino de cómo idear, componer con ingenio y tomar unas imágenes eficaces. En los dos primeros capítulos se presenta la estructura y el nivel del libro. Phyllis Morrison, especialista en didáctica de la ciencia, es la autora del tercer capítulo, donde hace una breve exposición histórica del uso que se hizo en el pasado de las técnicas visuales para comunicar ideas. En el capítulo 4 se exponen los fundamentos de la obtención de fotografías de calidad. Los capítulos 5, 6 y 7 constituyen el núcleo del libro; en ellos el hilo del texto va desde lo más grande a lo más pequeño, desde imágenes de nuevos materiales y estructuras biológicas, tomadas con una cámara y un objetivo, a imágenes conseguidas con un estereomicroscopio, un microscopio compuesto y un microscopio electrónico de barrido. Cada uno de esos tres capítulos ofrece unas posibilidades sobre las que se anima a investigar al lector. El capítulo 8 se consagra al escaneo y almacenamiento de imágenes. En palabras de la autora, “este libro pretende enseñar a ver”.

—J. VILARDELL



Microscopía electrónica de barrido de un polímero modelado (coloreado digital).

mejorar sus posibilidades de pasar a la generación siguiente. El primer método consiste en incrementar, por encima de su competidor, el número de descendientes viables; el segundo, en aumentar el porcentaje de descendencia que porta la secuencia en cuestión. En efecto, una secuencia que esté representada por una copia en un organismo sexual diploide la heredarán, de acuerdo con las leyes de Mendel, un 50 por ciento de la descendencia. Si una secuencia de ADN se las ingenia para instalarse en un 90 por ciento de la descendencia, entonces gozará de muchas probabilidades de persistir a lo largo del tiempo, aun cuando esa secuencia de ADN provoque una disminución de la adaptación. Los elementos genéticos que emplean esta segunda estrategia evolutiva constituyen el “ADN egoísta”.

Los transposones ocupan un lugar de privilegio. Dotados de capacidad para replicarse a sí mismos y trasladarse a nuevos sitios del cromosoma, los transposones constituyen el 45 por ciento del genoma humano. Se trata de fragmentos de ADN que se desgajan, se reproducen e insieren espontáneamente; viven en completa independencia en el genoma y condicionan el funcionamiento de los genes a menudo para lo peor, aunque a veces para lo mejor. Los transposones portan secuencias reguladoras que alteran secuencias vecinas. Así, tras la inserción de un transposón, los genes pueden adoptar nuevos perfiles de expresión temporal o espacial. En su acción mutágena, los transposones provocan reordenaciones cromosómicas de largo alcance.

—LUIS ALONSO



UN ROBOT EN CADA HOGAR, por Bill Gates

El líder de la revolución de la informática personal pronostica que el próximo sector de gran actividad será la robótica.



POSIBILIDADES Y LIMITACIONES DEL ETANOL, por Matthew L. Wald

El etanol podría sustituir a la gasolina, pero no será rentable mientras no sepamos destilarlo de los tallos de maíz.



EL PEZ CEBRA, VERSATILIDAD AL SERVICIO DE LA BIOMEDICINA, por A. Rojas Muñoz, A. Bernad Miana y J. C. Izpisúa Belmonte

El pez cebra se ha convertido en un modelo incomparable para investigar diferentes procesos biológicos. Sus cualidades genéticas y embrionarias se aprovechan para buscar nuevos medicamentos que permitan controlar enfermedades devastadoras.



DEFINICION DE PLANETA, por Steven Soter

La nueva y controvertida definición de planeta, que ha desterrado a Plutón, tiene sus puntos débiles, aunque aprehende los principios básicos de la astronomía.

BIOLOGIA EVOLUTIVA DEL CANCER, por Carl Zimmer

La selección natural carece de poder para erradicar el cáncer en nuestra especie. Algunos expertos sostienen que quizás habría facilitado los medios para la formación de tumores.

